

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE29.01.03  
#2

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2001年12月28日

REC'D 21 MAR 2003

出願番号

Application Number:

特願2001-400519

[ST.10/C]:

[JP2001-400519]

出願人

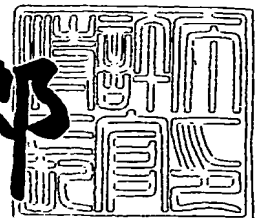
Applicant(s):

科学技術振興事業団  
株式会社国際電気通信基礎技術研究所PRIORITY  
DOCUMENTSUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2003年 3月 4日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田信一郎



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2003-3012488

【書類名】 特許願

【整理番号】 1011171

【提出日】 平成13年12月28日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G01R 33/035  
A61B 5/05

【発明者】

【住所又は居所】 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際  
電気通信基礎技術研究所内

【氏名】 佐藤 雅昭

【特許出願人】

【識別番号】 396020800

【住所又は居所】 埼玉県川口市本町4丁目1番8号

【氏名又は名称】 科学技術振興事業団

【特許出願人】

【識別番号】 393031586

【住所又は居所】 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2

【氏名又は名称】 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

【代理人】

【識別番号】 100064746

【弁理士】

【氏名又は名称】 深見 久郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100085132

【弁理士】

【氏名又は名称】 森田 俊雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100096781

【弁理士】

【氏名又は名称】 堀井 豊

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 008693

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 脳内電流源推定方法、脳内電流源推定プログラムおよび脳内電流源推定装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する前記電磁場の源となる電流源の位置を推定するための方法であって、

前記脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各前記仮想曲面上に格子点を設定するステップと、

各前記仮想曲面上において、それぞれ前記観測された電磁場を復元するための電流分布を推定するステップと、

前記複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、と、前記電流分布に基づいて復元される電磁場と前記観測された電磁場との誤差とに基づいて、前記複数の仮想曲面のうちから前記広がり、と誤差とが極小となる仮想曲面を、真の前記電流源の存在する曲面として特定するステップとを備える、脳内電流源推定方法。

【請求項 2】 前記電流分布を推定するステップは、

事前分布と前記電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求めるステップを含み、

前記真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、

前記仮想曲面のうち、対応する前記事後確率が最大となる仮想曲面を特定するステップを含む、請求項 1 記載の脳内電流源推定方法。

【請求項 3】 前記電流分布を推定するステップは、

前記複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に移行するのに応じて、前記脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第 1 の仮想曲面を特定するステップを含み、

前記真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、

前記第 1 の仮想曲面において、前記電流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定するステップと、

前記局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出すステップと、

前記複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、前記特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、前記事後確率が極大となる位置を、前記脳表面に近い側から順次特定するステップとを含む、請求項 2 記載の脳内電流源推定方法。

【請求項 4】 前記電流分布を推定するステップにおいては、第 1 の空間分解能で、前記電流分布を推定し、

前記複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、前記第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、前記電流分布の再推定を行うステップをさらに備える、請求項 3 記載の脳内電流源推定方法。

【請求項 5】 頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する前記電磁場の源となる電流源の位置を推定するコンピュータのためのプログラムであって、

前記脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各前記仮想曲面上に格子点を設定するステップと、

各前記仮想曲面上において、それぞれ前記観測された電磁場を復元するための電流分布を推定するステップと、

前記複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、と、前記電流分布に基づいて復元される電磁場と前記観測された電磁場との誤差とに基づいて、前記複数の仮想曲面のうちから前記広がり、と誤差とが極小となる仮想曲面を、真の前記電流源の存在する曲面として特定するステップとを実行させるためのプログラム。

【請求項 6】 前記電流分布を推定するステップは、

事前分布と前記電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求めるステップを含み、

前記真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、

前記仮想曲面のうち、対応する前記事後確率が最大となる仮想曲面を特定するステップを含む、請求項 5 記載のプログラム。

【請求項 7】 前記電流分布を推定するステップは、

前記複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に

移行するのに応じて、前記脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第 1 の仮想曲面を特定するステップを含み、

前記真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、

前記第 1 の仮想曲面において、前記電流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定するステップと、

前記局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出すステップと、

前記複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、前記特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、前記事後確率が極大となる位置を、前記脳表面に近い側から順次特定するステップとを含む、請求項 6 記載のプログラム。

【請求項 8】 前記電流分布を推定するステップにおいては、第 1 の空間分解能で、前記電流分布を推定し、

前記複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、前記第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、前記電流分布の再推定を行うステップをさらに備える、請求項 7 記載のプログラム。

【請求項 9】 頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する前記電磁場の源となる電流源の位置を推定するための脳内電流源推定装置であって、

前記脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各前記仮想曲面上に格子点を設定する仮想曲面設定手段と、

各前記仮想曲面上において、それぞれ前記観測された電磁場を復元するための電流分布を推定する電流分布推定手段と、

前記複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、前記電流分布に基づいて復元される電磁場と前記観測された電磁場との誤差とに基づいて、前記複数の仮想曲面のうちから前記広がり、誤差とが極小となる仮想曲面を、真の前記電流源の存在する曲面として特定する電流源特定手段とを備える、脳内電流源推定装置。

【請求項 10】 前記電流分布推定手段は、

事前分布と前記電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求

める事後確率導出手段を含み、

前記電流源特定手段は、

前記仮想曲面のうち、対応する前記事後確率が最大となる仮想曲面を特定する仮想曲面特定手段を含む、請求項 9 記載の脳内電流源推定装置。

【請求項 1 1】 前記電流分布推定手段は、

前記複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に移行するのに応じて、前記脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第 1 の仮想曲面を特定する最浅仮想曲面特定手段を含み、

前記電流源特定手段は、

前記第 1 の仮想曲面において、前記電流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定する局在電流分布特定手段と、

前記局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出す局所面抽出手段と、

前記複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、前記特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、前記事後確率が極大となる位置を、前記脳表面に近い側から順次特定する局所面位置特定手段とを含む、請求項 1 0 記載の脳内電流源推定装置。

【請求項 1 2】 前記電流分布推定手段は、初期的に第 1 の空間分解能で、前記電流分布を推定した後、前記複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、前記第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、前記電流分布の再推定を行う、請求項 1 1 記載の脳内電流源推定装置。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

この発明は、脳内活動に対応して、頭蓋外部に磁場または電場を生成する脳内電流源の位置や分布を推定する方法、脳内電流源推定プログラムおよび脳内電流源推定装置に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

近年の生体計測技術の進歩はめざましく、従来測定が困難で誤差も大きかった

脳から発生する微弱電場（脳波）や微弱磁場（脳磁波）の計測精度は、年々向上している。

【0003】

すなわち、外部からの刺激を受けて、脳内の神経細胞は電流を発生する。この電流により、上述したような微弱な電場や微弱な磁場が発生することになる。このうち「脳波」とは、この神経細胞の電流により、脳から発生する電場のことである。「脳波計（Electroencephalogram: EEG）」は、このような脳波を測定する手法である。

【0004】

一方、「脳磁波」とは、この神経細胞の電流により、脳から発生する磁場のことである。「脳磁計（Magnetoencephalography: MEG）」は、このような脳磁波を測定する手法である。脳磁波計測の最大の利点は、磁場が容積導体による影響をほとんど受けないので、頭蓋外からの磁気計測により、脳内電流源位置を3次元的に比較的正確に推定できることが期待されることである。

【0005】

このような脳磁波の解析においては、発生した磁場を脳の外部から測定することで非侵襲的に脳の活動部位を推定する。

【0006】

しかしながら、この磁場は非常に微弱であるために、地磁気等の外部の磁場の影響を大きく受けてしまう。そこで、外部の磁場を遮蔽するシールドを作り、その中で超伝導を用いた測定機器である超伝導量子干渉素子（SQUID: Superconducting quantum interference device）により微弱な磁場を測定することが行われる。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

ただし、このような「脳内電流源位置推定」のアルゴリズムの研究においても、初期のモデルから様々な変法が使用されているにも関わらず、決定的な手法は今だ存在しないのが現状である。

【0008】



たとえば、このような「脳内電流源位置推定」のアルゴリズムの1つである「双極子推定法」が、文献1：Mosher, J.C., Lewis P.S. and Leahy R.M. IEEE Trans. Biomed. Engng. <1992> vol. 39, pp.541-557に開示されている。しかしながら、この「双極子推定法」は、脳内の電流源が1つか数個の電流双極子で表せると仮定して観測磁場から双極子の位置を推定する方法であり、双極子の数を幾つにすれば良いかを決めるのが難しいという欠点を持っている。

【0009】

一方、他のアルゴリズムとしては、「空間フィルター法」が、文献2：Toyama K, Yoshikawa K, Yoshida Y, Kondo Y, Tomita S, Takanashi Y, Ejima Y, and Yoshikawa S. Neuroscience. 1999;91(2):pp.405-415 に開示されている。「空間フィルター法」は、生理学的な知見から、脳内電流源の場所を限定し、双極子の分布を推定する方法である。しかしながら、この方法の欠点は電流源の深さを正確に推定できない事である。

【0010】

本発明は、上記のような問題点を解決するためになされたものであって、その目的は、観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することが可能な脳内電流源推定方法を提供することである。

【0011】

この発明の他の目的は、複数の脳内電流源が存在する場合にも、観測データから複数の脳内電流源の位置を推定することが可能な脳内電流源推定方法を提供することである。

【0012】

この発明のさらに他の目的は、観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することが可能な脳内電流源推定プログラムを提供することである。

【0013】

この発明のさらに他の目的は、複数の脳内電流源が存在する場合にも、観測データから複数の脳内電流源の位置を推定することが可能な脳内電流源推定プログラムを提供することである。

## 【 0 0 1 4 】

この発明のさらに他の目的は、観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することが可能な脳内電流源推定装置を提供することである。

## 【 0 0 1 5 】

この発明のさらに他の目的は、複数の脳内電流源が存在する場合にも、観測データから複数の脳内電流源の位置を推定することが可能な脳内電流源推定装置を提供することである。

## 【 0 0 1 6 】

## 【課題を解決するための手段】

このような目的を達成するために、本発明の脳内電流源推定方法は、頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する電磁場の源となる電流源の位置を推定するための方法であって、脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各仮想曲面上に格子点を設定するステップと、各仮想曲面上において、それぞれ観測された電磁場を復元するための電流分布を推定するステップと、複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、電流分布に基づいて復元される電磁場と観測された電磁場との誤差とに基づいて、複数の仮想曲面のうちから広がり誤差とが極小となる仮想曲面を、真の電流源の存在する曲面として特定するステップとを備える。

## 【 0 0 1 7 】

好ましくは、電流分布を推定するステップは、事前分布と電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求めるステップを含み、真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、仮想曲面のうち、対応する事後確率が最大となる仮想曲面を特定するステップを含む。

## 【 0 0 1 8 】

好ましくは、電流分布を推定するステップは、複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に移行するのに応じて、脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第1の仮想曲面を特定するステップを含み、真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、第1の仮想曲面において、電

流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定するステップと、局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出すステップと、複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、事後確率が極大となる位置を、脳表面に近い側から順次特定するステップとを含む。

#### 【 0 0 1 9 】

好ましくは、電流分布を推定するステップにおいては、第 1 の空間分解能で、電流分布を推定し、複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、電流分布の再推定を行うステップをさらに備える。

#### 【 0 0 2 0 】

この発明の他の局面に従うと、頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する電磁場の源となる電流源の位置を推定するコンピュータのためのプログラムであって、脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各仮想曲面上に格子点を設定するステップと、各仮想曲面上において、それぞれ観測された電磁場を復元するための電流分布を推定するステップと、複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、電流分布に基づいて復元される電磁場と観測された電磁場との誤差とに基づいて、複数の仮想曲面のうちから広がり誤差とが極小となる仮想曲面を、真の電流源の存在する曲面として特定するステップとを実行させる。

#### 【 0 0 2 1 】

好ましくは、電流分布を推定するステップは、事前分布と電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求めるステップを含み、

真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、仮想曲面のうち、対応する事後確率が最大となる仮想曲面を特定するステップを含む。

#### 【 0 0 2 2 】

好ましくは、電流分布を推定するステップは、複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に移行するのに応じて、脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第 1 の仮想曲面を特定するステップを含み、真の電流源の存在する曲面として特定するステップは、第 1 の仮想曲面において、電

流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定するステップと、局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出すステップと、複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、事後確率が極大となる位置を、脳表面に近い側から順次特定するステップとを含む。

## 【 0 0 2 3 】

好ましくは、電流分布を推定するステップにおいては、第 1 の空間分解能で、電流分布を推定し、複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、電流分布の再推定を行うステップをさらに備える。

## 【 0 0 2 4 】

この発明のさらに他の局面に従うと、頭蓋外部において観測された電磁場に基づいて、脳内に存在する電磁場の源となる電流源の位置を推定するための脳内電流源推定装置であって、脳内に脳表面からの深さが互いに異なり、かつ互いに交わらない形状を有する複数の仮想曲面と、各仮想曲面上に格子点を設定する仮想曲面設定手段と、各仮想曲面上において、それぞれ観測された電磁場を復元するための電流分布を推定する電流分布推定手段と、複数の仮想曲面上において推定された電流分布の広がり、電流分布に基づいて復元される電磁場と観測された電磁場との誤差とに基づいて、複数の仮想曲面のうちから広がり誤差とが極小となる仮想曲面を、真の電流源の存在する曲面として特定する電流源特定手段とを備える。

## 【 0 0 2 5 】

好ましくは、電流分布推定手段は、事前分布と電磁場の観測データとから、ベイズ推定法により事後確率を求める事後確率導出手段を含み、電流源特定手段は、仮想曲面のうち、対応する事後確率が最大となる仮想曲面を特定する仮想曲面特定手段を含む。

## 【 0 0 2 6 】

好ましくは、電流分布推定手段は、複数の仮想曲面のうち、脳表面側の仮想曲面から順次深い側の仮想曲面に移行するのに応じて、脳表面に最も近く、かつ事後確率が極大になる第 1 の仮想曲面を特定する最浅仮想曲面特定手段を含み、電

流源特定手段は、第 1 の仮想曲面において、電流分布の極大点に対応する局在電流分布を特定する局在電流分布特定手段と、局在電流分布を各々が含む複数の局所面を切り出す局所面抽出手段と、複数の局所面のうち、特定対象となる局所面以外を固定し、特定対象となる局所面を深さ方向に動かして、事後確率が極大となる位置を、脳表面に近い側から順次特定する局所面位置特定手段とを含む。

【 0 0 2 7 】

好ましくは、電流分布推定手段は、初期的に第 1 の空間分解能で、電流分布を推定した後、複数の仮想曲面の深さ方向の分解能を高め、かつ、第 1 の空間分解能よりも高い第 2 の空間分解能で、電流分布の再推定を行う。

【 0 0 2 8 】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

【 0 0 2 9 】

なお、上述のとおり、脳内活動を外部から観測する手法としては、脳磁計 (Magnetoencephalography:MEG) や脳波計 (Electroencephalogram:EEG) がある。以下では、これらのうち、主に MEG について説明することにする、ただし、MEG における磁場を電場に置き換えれば EEG についても、本発明を適用することが可能である。

【 0 0 3 0 】

したがって、本明細書においては、本来「電場」と「磁場」とが複合して存在する「電磁場」に対して、「観測対象」となる物理量が「電場」である場合、または「磁場」である場合とを総称して、「電磁場を観測する」と呼ぶことにする。

【 0 0 3 1 】

図 1 は、脳磁計システムの構成の一例を示す概念図である。

脳磁計 1 2 には、マルチチャンネルの S Q U I D 磁束計 (超高感度磁気測定器) アレイを備えており、被験者 1 0 の頭蓋表面での磁場を測定する。この脳磁計 1 2 での測定結果を受け取って、コンピューターシステム 2 0 が、測定結果を解析し、脳内の電流源の位置の推定処理を行う。

## 【 0 0 3 2 】

本発明は、このコンピュータシステム 2 0 でのソフトウェア処理に関するものである。ただし、処理の一部ないし全部は、処理時間の高速化のためにハードウェアにより行われる構成であってもよい。

## 【 0 0 3 3 】

## 〔脳内電流源推定の原理〕

以下、本発明の「脳内電流源推定方法」の詳細について、説明する前に、本発明の推定方法の原理、および概略についてまとめておく。

## 【 0 0 3 4 】

## (曲面上の電流分布による電磁場の復元)

電流源を金属面で完全に囲み込めば、金属面の外側に電磁場が存在しなくなることは電磁シールドの原理として良く知られている。これは見方を変えれば、この金属面に適当な電流を流してやれば電流源が作る電磁場と全く同じ電磁場を金属面の外側に作れることを示している。逆に金属面の外側にある電流源が作る電磁場はこの金属面にどのような電流を流しても完全には復元できない。この事実を以後「電磁場復元の原理」と呼ぶ。

## 【 0 0 3 5 】

図 2 は、電流源が作る電磁場を適当な曲面上で観測している場合の概念図である。

## 【 0 0 3 6 】

図 2 に示すように、観測曲面と電流源の間に仮想曲面を用意すると、上に述べた「電磁場復元の原理」から仮想曲面上に適当な電流を流してやれば電流源が観測面上に作る電磁場を復元できることが分かる。

## 【 0 0 3 7 】

図 3 は、脳内の電流源と複数の仮想曲面との関係を示す概念図である。

図 3 に示すとおり、電流が作る電磁場は距離の二乗に逆比例して減衰することを考慮すれば、電流源と等価な仮想曲面（仮想曲面 2）上の電流の広がりには仮想曲面が電流源から遠ざかるほど広がってゆく。したがって、仮想曲面 1 上の電流の広がりには、仮想曲面 2 上の電流の広がりよりも大きい。

## 【 0 0 3 8 】

一方、電流源に対して観測曲面と反対側にある仮想曲面（仮想曲面 3）では電流源が観測面に作る電磁場を完全に復元する事が出来ない。

## 【 0 0 3 9 】

本発明では、以上の原理を元に観測面上での電磁場の観測データから電流源を推定する。

## 【 0 0 4 0 】

## （電流源推定の原理）

図 2 に示すように、脳内で発生した電流源から作られる磁場（または電場）を脳の表面近くの観測面で観測していると仮定する。

## 【 0 0 4 1 】

脳内に仮想曲面を考え、観測された磁場を復元する仮想曲面上の電流分布を求める。この仮想曲面を脳表面から半径を縮めながら脳の内部へ移動させてゆくと、観測磁場を復元する電流分布は、その広がりが小さくなってゆき真の電流源を仮想曲面が含むときに最小になる。また仮想曲面を電流源より深く移動させていくと仮想曲面上での電流分布の広がりは再び広がってゆき、この電流が生ずる磁場と観測磁場との誤差も大きくなってゆく。

## 【 0 0 4 2 】

すなわち、観測磁場を復元する電流分布の広がりや磁場の復元誤差を見ることにより電流源の深さが特定できる。またこのようにして特定された深さの仮想曲面上の電流分布を求めれば電流源の広がりもわかることになる。以上が本発明の原理である。

## 【 0 0 4 3 】

## （ベイズ推定法による電流源の深さの特定）

上述した電流源推定の原理を具体的に実施するにあたり、本発明では、以下のような確率論に基づく手続きをとる。その手続きの概略を以下にまとめることにする。

## 【 0 0 4 4 】

MEG や EEG で観測できるのは脳表面近くの数十カ所の磁場（電場）である。また

仮想曲面上の電流分布を近似するために、仮想曲面上に格子点を設定し各格子点に電流双極子（または適当な電流源モデル）を割り当てる。電流分布を高い分解能で推定するためには格子点の数を増やして格子点の密度を大きくする必要がある。

【0045】

一方、仮想曲面上の格子点の数を観測点の数より増やすと解が一意に決まらない。また観測点より推定点の数の方が多いと、観測データ数よりも推定すべきパラメータの数の方が多くなるので、電流源より深い位置にある仮想曲面でも観測磁場の復元性が良くなる。

【0046】

このような困難を解決するために、本発明ではベイズ推定理論を利用して仮想曲面上の電流分布を推定する。ベイズ推定を行う際に、電流源に関する事前知識を表す事前分布を用いる。具体的には、電流分布の広がりができるだけ小さく推定されるような事前分布、すなわち、観測データだけではその強さが良く特定できないような格子点上の電流双極子は、その強さがゼロに近くなるような事前分布を導入する。これは有効信号路自動決定 (Automatic Relevance Determination: ARD) 事前分布と呼ばれる階層的な事前分布を導入することで実現できる。

【0047】

しかし、ARD事前分布と観測データから事後確率分布を解析的に計算することは不可能である。そこで、本発明では、後に説明するように、事後確率分布を近似的に計算する手法として変分法的ベイズ推定法 (Variational Bayes method) を用いる。ただし、モンテカルロ法等の他の近似手法を用いることも可能である。

【0048】

このARD事前分布を用いたベイズ推定法を行うことにより、観測データを復元し、かつ出来るだけ広がり少ない仮想曲面上の電流分布が得られる。また深さの異なる仮想曲面を使って推定を行ったときのモデル事後確率を比べることにより電流源の深さが特定できる。

【0049】



モデル事後確率の対数は対数尤度項とモデル複雑度項の和で表される。対数尤度項は復元誤差が小さいほど大きくなる。

【 0 0 5 0 】

一方、モデル複雑度項は有効な（すなわち適当なしきい値以上の強さを持つ）格子点上の電流双極子の数が少ないほど大きくなる。上述したように、復元誤差と仮想曲面上の電流分布の広がり（有効な電流双極子の数）は仮想曲面の深さが電流源と一致したときに最小になるので、この時モデル事後確率が最大になることが分かる。すなわちモデル事後確率が最大になる深さの仮想曲面上に電流源が存在することが分かる。

【 0 0 5 1 】

すなわち、以上をまとめると、本発明は、脳磁波（MEG）や脳波（EEG）の観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定する方法を提供する。

【 0 0 5 2 】

本発明の基本的な考え方は、上述のとおり、電流源と観測面の間にある曲面上に適当な電流を流すことによって、電流源が発生する電磁場を復元することができ、またこの曲面が電流源に近づくほど曲面上の電流分布の広がりが小さくなるという点に基づく。この考え方をベースに、本発明は、観測データを復元する曲面上の電流分布に対するベイズ推定を行う際、モデル事後確率は曲面が電流源を含むときに最大になること、すなわちモデル事後確率を調べることにより電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することを1つの特徴とする。

【 0 0 5 3 】

（複数個の電流源の存在する場合）

以上では、電流源が一つの場合について説明したが、この方法は電流源が複数ある場合にも適用できる。

【 0 0 5 4 】

電流により生ずる電磁場は距離の二乗に逆比例して減衰するので、脳表面に最も近い電流源が脳表面の観測磁場に最も影響を与える。そこで脳表面に近い電流源から順番に特定することが出来る。

【 0 0 5 5 】

仮想曲面を脳表面からだんだん深くしてゆくと脳表面に最も近い電流源（これを第1電流源と呼ぶ）の近くでモデル事後確率が極大になる。電流源が2つ以上ある場合にはこの仮想曲面上の電流分布には電流源の数に対応した局所的な電流双極子の集合が複数個出来る。

## 【0056】

この局所的な電流双極子の集合を局在電流分布と呼ぶ。個々の局在電流分布を含む局所面を切り出し、これを深さ方向に動かしてモデル事後確率を求める。第1電流源に対応した局所面を動かしたときにはモデル事後確率が第1電流源の深さで極大になる。しかし、これ以外の局所面を動かしてもモデル事後確率は第1電流源の深さで極大になることはない。このことから第1電流源の位置、すなわち最も表面に近い電流源の位置が特定できる。

## 【0057】

2番目に深い電流源を求めるために、第1電流源に対応する局所面を固定し、残りの局所面の深さを同じにして深くしてゆく。すると今度は2番目に深い電流源のところでモデル事後確率が極大になる。ここでまた個々の局所面を深さ方向に動かすと第2電流源に対応する局所面を動かしたときにのみ第2電流源の深さでモデル事後確率が極大になる。こうして第2電流源の位置を特定できる。3番目以降の電流源も同様にして順次特定することが出来る。

## 【0058】

この方法は個々の局所面の深さを独立に動かして調べる方法に比べて、計算時間がずっと少なくて済むという利点を持つ。

## 【0059】

（逐次的に解像度を上げる方法）

以上のようにして、脳表面に近い側から各電流源の位置を特定することが可能であることに加えて、本発明の脳内電流源推定方法では、電流源推定の解像度を逐次的に上げることが出来る。

## 【0060】

すなわち、まず低い解像度で（仮想曲面上の格子点の数を少なくし、深さ方向の標本点の数も少なくして）電流源の位置を大雑把に推定する。この段階で各電

流源に対応した局所面の位置が大体定まっている。

【 0 0 6 1 】

次により高い分解能で推定を行う。この時、局所面の面積は元の仮想曲面の面積に比べて小さくなっているため、同じ数の格子点を使っても分解能は高くなる。深さ方向の分解能もあげて電流源の位置の推定精度を上げることが出来る。分解能を上げたときに電流分布がより局在する場合には局所面をより小さくして再び分解能を上げて推定できる。

【 0 0 6 2 】

一方、分解能を上げて電流分布の広がりも余り変わらなければ、この電流源が広がっていることを示している。このようにして電流源の広がり具合に応じて分解能を調節することが可能である。

【 0 0 6 3 】

〔電流源推定の具体的手続き〕

以下では、以上概説した手続きにしたがって、具体的に「脳内電流源」の位置を特定する手続きについて、さらに詳しく説明する。

【 0 0 6 4 】

〔 ( I ) 電流源推定のための準備〕

以下に説明する電流源推定のための処理手順を行なうに当たって、まず、その準備となる手続きについて説明する。

【 0 0 6 5 】

すなわち、電流分布の推定のために、以下の手続きを予め行っておく必要がある。

【 0 0 6 6 】

( I - 1 ) 仮想曲面形状と電流モデルの決定

( I - 2 ) さらに、仮想曲面を移動させてその仮想的な電流分布を推定するに当たり、仮想曲面上のサンプル点と、深さ方向のサンプル地点の決定を行なう必要がある。

【 0 0 6 7 】

( I - 3 ) また、以下で詳しく説明するように、電流分布推定のための階層

事前分布の分布形状を指定するためのパラメータを初期値として予め決定しておく必要がある。

【0068】

以下では、上述した（I-1）仮想曲面形状と電流モデルの決定の手続きについて、さらに詳しく説明する。

【0069】

（I-1-1） 仮想曲面形状の決定

最も単純な仮想曲面形状は、脳を半球とみなし、半径の異なるいろいろな半球面を仮想曲面とすることにより得られるものである。

【0070】

核磁気共鳴画像（Magnetic Resonance Imaging: MRI）等の他の測定方法により、大脳皮質等の脳内電流が存在する可能性のある場所がわかっている場合には、それらの情報をもとに仮想曲面形状を決定することもできる。

【0071】

この場合は、深さの異なる仮想曲面の形状が一般に異なってもよいが、互いに交わらないように形状を決めておく必要がある。

【0072】

（I-1-2） 電流モデルの決定

仮想曲面状の電流モデルとして、ここでは電流双極子モデルを考える。ただし、他の電流モデルを考えることも可能である。

【0073】

仮想曲面上に適当な格子点（サンプル点） $\{X_n \mid n = 1, \dots, N\}$ を考える。各格子点上に電流の強さが $j_n$ の電流双極子を考える。このとき、格子点 $X_n$ の電流双極子 $j_n$ が脳表面上での観測点 $Y_i$ （ $i = 1, \dots, I$ ）に作る磁場は、以下の式で表わされる。

【0074】

【数 1】

$$\mu \frac{j_n \times (Y_i - X_n)}{|Y_i - X_n|^3}$$

【0075】

ここで、 $\mu$ は透磁率であり、たとえば、ベクトル $X_n$ に対し、記号 $|X_n|$ は、ベクトル $X_n$ の絶対値を表す。

【0076】

このとき、仮想曲面上の電流双極子 $\{j_n | n=1, \dots, N\}$ が観測点 $Y_i$  ( $i=1, \dots, I$ )に作る磁場は、次式で表わされる。

【0077】

【数 2】

$$B(Y_i) = \sum_{n=1}^N \mu \frac{j_n \times (Y_i - X_n)}{|Y_i - X_n|^3}$$

【0078】

観測点 $Y_i$ で観測できる磁場の方向をベクトル $S_{i,c}$  ( $c=1, \dots, C$ )とすると、この点での磁場のベクトル $S_{i,c}$ 方向成分 $B_{i,c}$ は、次式のようにになる。

【0079】

【数 3】

$$B_{i,c} = \sum_{n=1}^N \mu \frac{(j_n \times (Y_i - X_n)) \cdot S_{i,c}}{|Y_i - X_n|^3}$$

【0080】

また、観測磁場として磁場の局所的勾配を測定する場合には、上式の $Y_i$ による微分を観測することになる。

【0081】

格子点 $X_n$  (位置ベクトル) での電流双極子の方向に制限をつける場合には、電流双極子の可能な独立方向を $b_{n,d}$  ( $d=1, \dots, D$ )として、電流双極子は

以下の式で表わされる。この式において、 $D=3$ の場合は方向に制限がない場合に対応している。

【0082】

【数4】

$$\mathbf{j}_n = \sum_{d=1}^D \mathbf{j}_{n,d} \cdot \mathbf{b}_{n,d}$$

【0083】

以上まとめると、仮想曲面上の格子点  $\{X_n \mid n=1, \dots, N\}$  での電流双極子が観測点  $Y_i$  に作る磁場は次式のように書ける。

【0084】

【数5】

$$\mathbf{B}_{i,c} = \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D \mathbf{j}_{n,d} G(i, c; n, d)$$

$$G(i, c; n, d) = \mu \frac{(\mathbf{b}_{n,d} \times (\mathbf{Y}_i - \mathbf{X}_n)) \cdot \mathbf{S}_{i,c}}{|\mathbf{Y}_i - \mathbf{X}_n|^3}$$

【0085】

ここで、 $\mathbf{j}_{n,d}$  は、格子点  $X_n$  での電流双極子の独立な成分である。また、関数  $G(i, c; n, d)$  は格子点  $X_n$  での電流双極子  $\mathbf{b}_{n,d}$  が観測点  $Y_i$  に作る磁場の  $\mathbf{S}_{i,c}$  方向成分である。

【0086】

電流分布推定の問題とは、観測された磁場  $\{\mathbf{B}_{i,c} \mid i=1, \dots, I; c=1, \dots, C\}$  から仮想曲面上の電流分布  $\{\mathbf{j}_{n,d} \mid n=1, \dots, N; d=1, \dots, D\}$  を推定する問題であるといえる。

【0087】

上述した観測点における磁場の測定値を行列表現を用いて表わすこととすると、以下のように書くことができる。

【0088】

【数6】

$$B = G \cdot J$$

$B = (B_{i,c} \mid i=1, \dots, I; c=1, \dots, C) : (I \times C) \text{次元ベクトル}$

$J = (j_{n,d} \mid n=1, \dots, N; d=1, \dots, D) : (N \times D) \text{次元ベクトル}$

$G = (G(i, c; n, d) \mid i=1, \dots, I; c=1, \dots, C; n=1, \dots, N; d=1, \dots, D)$   
 $: (I \times C) \times (N \times D) \text{次元行列}$

【0089】

(電流源確率モデル)

このように電流モデルを決定した上で、さらにこのような電流分布の推定のために、以下に説明する「電流源の確率モデル」を導入する。

【0090】

(I-1-3) 電流源確率モデル

上述した仮想曲面上の電流モデルに対する確率モデルを以下のように考える。観測される磁場は仮想曲面上の電流分布  $J$  から作られる磁場と観測ノイズの和として表わされるとする。また、観測ノイズは測定場所によらないバイアス成分と各測定点で独立な分散  $\sigma^2$  を持つガウスノイズの和として表わされるとする。

【0091】

すなわち、観測磁場が以下の式のように表わされるものとする。

【0092】

【数 7】

$$B = G \cdot J + \xi$$

$$J = (J_{\text{仮想曲面}}, J_0)$$

$$J_{\text{仮想曲面}} = (j_{n,d} \mid n=1, \dots, N; d=1, \dots, D)$$

$J_0$  : ノイズのバイアス成分

$$G = (G(i, c; n, d) \mid i=1, \dots, I; c=1, \dots, C; n=1, \dots, N; d=1, \dots, D)$$

$$G(i, c; 0) \equiv 1$$

$$\xi = (\xi_{i,c} \mid i=1, \dots, I; c=1, \dots, C)$$

: 各成分が互いに独立な分散  $\sigma^2$  をもつガウスノイズ

【0093】

この電流モデルに対する確率分布は以下のように与えられる。

まず、ある特定の深さに対する仮想曲面、あるいは各局所面の深さが指定された局所面の集合を  $M$  で表わす。この仮想曲面  $M$  上の電流分布  $J$  が与えられたときに、観測される磁場が  $B$  である確率  $P(B \mid J, \beta, M)$  は、以下の式で表わされる。ただし、以下の式において、 $\beta = 1 / \sigma^2$  である。

【0094】

【数 8】

$$P(B \mid J, \beta, M) =$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\beta \mid B - G \cdot J \mid^2 + \frac{1}{2}(I \cdot C) \log(\beta / 2\pi)\right]$$

$$\beta = 1 / \sigma^2$$

【0095】

(I-1-4) 階層事前分布



仮想曲面M上の電流分布Jに対する事前分布として、上述したように、ARD階層事前分布を仮定することにする。

【0096】

観測を行なう前の電流分布Jに対する事前分布（Jが実現する確率）はARD階層事前分布の仮定の下で以下の式のように表わされる。

【0097】

【数9】

$$P_0(J | \alpha, \beta, M) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \beta \sum_{n=1}^N \alpha_n \left( \sum_{d=1}^D j_{n,d} \right)^2 + \frac{D}{2} \sum_{n=1}^N \log(\beta \alpha_n / 2\pi) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \beta \alpha_0 j_0^2 + \frac{1}{2} \log(\beta \alpha_0 / 2\pi) \right]$$

$$P_0(\beta | \tau, M) = \Gamma(\beta | 1/\tau, \gamma_{\beta 0})$$

【0098】

ただし、 $\Gamma(\dots)$  は、ガンマ分布を表わし、次式のように定義される。次式において、 $\Gamma(\gamma_0)$  は、ガンマ関数であり、その定義式も併せて示す。

【0099】

【数10】

$$\Gamma(\beta | b, \gamma_0) \equiv \frac{1}{\beta} (\gamma_0 \beta / b)^{\gamma_0} \frac{1}{\Gamma(\gamma_0)} e^{-\gamma_0 \beta / b}$$

$$\Gamma(\gamma_0) \equiv \int_0^\infty dt \, t^{\gamma_0-1} e^{-t}$$

【0100】

また、 $\alpha$ と $\tau$ は、電流分布Jとノイズ逆分散 $\beta$ に対する事前分布をモデル化するために導入されたハイパーパラメータであり、この $\alpha$ と $\tau$ に対する階層事前分布 $P_0(\alpha | M)$ と $P_0(\tau | M)$ は以下のように与えられる。

【0101】

【数 1 1】

$$P_0(\alpha | M) = \prod_{n=1}^N \Gamma(\alpha_n | a, \gamma_{\alpha 0})$$

$$P_0(\tau | M) = \Gamma(\tau | \overline{\tau}_0, \gamma_{\tau 0})$$

【0102】

なお、上式において、 $\alpha$ と $\tau$ に関連する各パラメータの値については、後に詳しく説明する。

【0103】

(I-1-5) ベイズ推定

磁場のデータ  $B$  を観測したときに、電流分布が  $J$  である事後確率分布  $P(J | B, M)$  は、ベイズの定理を使って以下のように求まる。

【0104】

【数 1 2】

$$P(J | B, M) = \int d\beta d\alpha d\tau P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)$$

【0105】

ここで、事後確率分布  $P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)$  は、以下の式で表される

【0106】

【数 1 3】

$$P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M) =$$

$$\frac{P(B | J, \beta, M) P_0(J | \alpha, \beta, M) P_0(\beta | \tau, M) P_0(\alpha | M) P_0(\tau | M)}{P(B | M)}$$

$$P(B | M) =$$

$$P(B | M) =$$

$$\int dJ d\beta d\alpha d\tau P(B | J, \beta, M) P_0(J | \alpha, \beta, M) P_0(\beta | \tau, M) P_0(\alpha | M) P_0(\tau | M)$$

【0107】

この事後確率分布を用いて、電流分布の期待値  $E[J | B, M]$  は以下のよう

に与えられる。

【0108】

【数14】

$$J = E[J | B, M] = \int dJ d\beta d\alpha d\tau P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M) J$$

【0109】

また、 $P(B | M)$  は仮想曲面モデル  $M$  の周辺尤度である。電流源の深さを推定するとき、深さの異なるいくつかのモデルを比べる。このとき、深さに関する事前の知識がないものとする。すなわち、以下では、 $P(M) = \text{一定であるもの}$  とする。

【0110】

観測データ  $B$  が与えられたときに、モデル  $M$  が真のモデルである確率、すなわち、モデル事後確率  $P(M | B)$  は、上の仮定のもとでモデル周辺尤度  $P(B | M)$  に比例し、以下の関係が成り立つ。

【0111】

【数15】

$$P(M | B) \propto P(B | M)$$

【0112】

(I-1-6) 変分法的ベイズ推定

確率モデルと階層事前分布が与えられたときに、モデル周辺尤度を解析的に求めることは一般的にはできない。

【0113】

そこで、モデル周辺尤度を近似的に計算する手法として、変分法的ベイズ法を用いる。モンテカルロ法や、ラプラス近似法等、他の近似方法を使うことも可能である。

【0114】

「変分法的ベイズ法」について、具体的な手続きは後述するものとして、以下に簡単に説明しておく。

【0115】

真の事後分布  $P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)$  を近似的に求めるために、試験事後分布  $Q(J, \beta, \alpha, \tau)$  を考える。

【0116】

2つの確率分布  $P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)$  と  $Q(J, \beta, \alpha, \tau)$  の近さは、次式で表されるような K-L 距離を用いて計算することができる。

【0117】

【数16】

$$KL(P \parallel Q)$$

$$= \int dJ d\beta d\alpha d\tau Q(J, \beta, \alpha, \tau) \log \left[ \frac{Q(J, \beta, \alpha, \tau)}{P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)} \right]$$

$$= \log P(B | M) - F(Q) \geq 0$$

$$F(Q) \equiv$$

$$\int dJ d\beta d\alpha d\tau Q(J, \beta, \alpha, \tau) \times$$

$$\log \left[ \frac{P(B | J, \beta, M) P_0(J | \alpha, \beta, M) P_0(\beta | \tau, M) P_0(\alpha | M) P_0(\tau | M)}{Q(J, \beta, \alpha, \tau)} \right]$$

【0118】

K-L 距離は、2つの分布が等しいときに限りゼロになり、それ以外の場合は常に正の値をとる。

【0119】

上式において試験事後分布  $Q$  に対する自由エネルギー  $F(Q)$  を定義すると、以下の不等式が得られることになる。

【0120】

【数17】

$$F(Q) \leq \log P(B | M)$$

【0121】

すなわち、自由エネルギー  $F(Q)$  を最大にする分布  $Q(J, \beta, \alpha, \tau)$  は、真の事後分布  $P(J, \beta, \alpha, \tau | B, M)$  に等しくなり、このとき自由エネルギーは対数周辺尤度に等しくなる。

【0 1 2 2】

変分法的ベイズ法では、 $Q(J, \beta, \alpha, \tau)$  の関数形を以下の形に制限して自由エネルギーの最大化を行なう。

【0 1 2 3】

【数 1 8】

$$Q(J, \beta, \alpha, \tau) = Q_J(J, \beta) Q_\alpha(\alpha, \tau)$$

【0 1 2 4】

上式の右辺第 2 項  $Q_\alpha$  を固定して、右辺第 1 項  $Q_J$  に関して  $F(Q)$  を最大化するステップと、第 1 項  $Q_J$  を固定して、第 2 項  $Q_\alpha$  に関して  $F(Q)$  を最大化するステップを交互に繰り返すことにより、自由エネルギー  $F(Q)$  を極大にする分布  $Q^*$  が得られることになる。

【0 1 2 5】

〔(I I) 電流源推定の手順〕

以上のような準備の下に、以下電流源を推定する具体的な手続きについて、図にしたがって説明する。

【0 1 2 6】

図 4 は、本発明の脳内電流源の位置の推定方法の手順の全体的な流れを示すフローチャートである。

【0 1 2 7】

図 4 を参照して、まず、脳内電流源の位置の推定処理が開始されると（ステップ S 1 0 0）、上述したように、電流分布推定のための階層事前分布の分布形状を指定するためのパラメータの値と推定すべき変数の初期値を決定する（ステップ S 1 0 2）。

【0 1 2 8】

続いて、初期分解能を用いた電流源の初期推定が行われ、電流源の候補の抽出

が行われる（ステップ S 1 0 4）。

【 0 1 2 9 】

さらに、このようにして抽出された電流源の候補のうち、まず、最も脳表面に近い電流源の位置の特定が行われる（ステップ S 1 0 6）。その後、他の電流源の深さの特定が順次行われる（ステップ S 1 0 8）。

【 0 1 3 0 】

以上のようにして、初期分解能による電流源の位置の特定が行われた後、空間分解能を上げて、電流源の位置の再推定が行われ（ステップ S 1 1 0）、処理が終了する（ステップ S 1 1 2）。

【 0 1 3 1 】

以下、図 4 で説明した各ステップの処理について、さらに詳しく説明する。

（ I I - 1 ） 初期分解能を用いた電流源の初期推定（電流源の候補の抽出）

図 5 は、図 4 で説明した処理のうち、ステップ S 1 0 4 の処理、すなわち、初期分解能を用いた電流源の初期推定の処理を説明するためのフローチャートである。

【 0 1 3 2 】

図 5 を参照して、まず、初期分解能での深さ方向のサンプル地点を  $\{R_k \mid k = 1, \dots, K\}$  とする。各深さ  $R_k$  における仮想曲面に対して電流分布の推定を行なう。さらに、このようにして推定された電流分布に基づいて、各深さ  $R_k$  に対する事後確率を求める。この事後確率が後に説明する自由エネルギー値に相当する（ステップ S 2 0 2）。

【 0 1 3 3 】

以上のようにして求められた事後確率が最大になる深さ  $R_M$  での電流分布に対して、電流の強さの極大点を求める（ステップ S 2 0 4）。

【 0 1 3 4 】

さらに、各極大点を含む局所面を決定する。局所面の数を  $L$  個とすると、各局所面が局在化された電流源の候補となる（ステップ S 2 0 6）。

【 0 1 3 5 】

以下、図 4 中のステップ S 1 0 2 の処理および、それに続く図 5 中のステップ

S202の処理について、さらに詳しく説明する。

【0136】

(II-1-1) 電流分布推定のための階層事前分布の分布形状を指定するためのパラメータの値と推定すべき変数の初期値の決定

上述したとおり、電流源の推定は、変分法的ベイズ法を用いて行われる。したがって、図4のステップS102の処理は、このような変分法的ベイズ法の適用にあたって、以下のように行われる。

【0137】

階層事前分布の分布形状を指定するパラメータを以下のように決定する。

【0138】

【数19】

$$\gamma_{\beta 0}=1 \quad (\text{より一般的には、} 0 < \gamma_{\beta 0} \leq 1)$$

$$\gamma_{\tau 0}=1 \quad (\text{より一般的には、} 0 < \gamma_{\tau 0} \leq 1)$$

$$\gamma_{\alpha 0}=0.1 \quad (\text{より一般的には、} 0 < \gamma_{\alpha 0} \leq 1)$$

$$\overline{\tau}_0 = \kappa_{\tau} \cdot \text{Var}(\mathbf{B}), \quad \kappa_{\tau}=1 \quad (\text{より一般的には、} \kappa_{\tau} \sim 1)$$

$$\text{Var}(\mathbf{B}) = \frac{1}{I \cdot C} \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C (B_{i,c} - \overline{B})^2$$

$$\overline{B} = \frac{1}{I \cdot C} \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C B_{i,c}$$

$$a = \kappa_{\alpha} \cdot \frac{1}{\tilde{N}} \text{Tr}(\mathbf{G}^* \cdot \mathbf{G}), \quad \kappa_{\alpha}=0.1 \quad (\text{より一般的には、} 0 < \kappa_{\alpha} \leq 1)$$

$$\tilde{N} = D \cdot N + 1$$

【0139】

さらに、上述した式に基づいて、各変数の初期設定を以下に行なう。

【0140】

【数 20】

$$\gamma_{\beta} = \frac{1}{2} I \cdot C + \gamma_{\beta 0}$$

$$\gamma_{\tau} = \gamma_{\tau 0} + \gamma_{\beta 0}$$

$$\gamma_{\alpha} = \gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2} D$$

$$\overline{\alpha_n} = a$$

$$\overline{\tau} = \tau_0$$

$$\Sigma_G = G' \cdot G$$

【0141】

(II-1-2) 電流分布推定のための変分法的ベイズ法の具体的処理

(1) パラメータ  $J$ ,  $\beta$  の期待値の計算 (M-ステップの処理)

ここでは、パラメータ  $J$ ,  $\beta$  の期待値の計算を行なう。この処理により、 $Q_J$  に関して自由エネルギー  $F(Q)$  を最大化する処理が行なわれる。

【0142】

対角行列  $A$  を以下のように定義することで、 $Q_J$  が以下の式に基づいて導出される。なお、以下の式において、変数の期待値には、その変数名の上に、“ $-$ ” をつけて表現している。

【0143】



【数 2 1】

$$A(n, d; n', d') = \delta_{nn'} \delta_{dd'} \overline{\alpha_n}$$

$$(n, n' = 1, \dots, N; d, d' = 1, \dots, D)$$

$$A(n, d; 0) = A(0; n', d') = 0$$

$$A(0; 0) = \overline{\alpha_0}$$

$$\Sigma = \Sigma_G + A$$

$$\overline{J} = \Sigma^{-1} \cdot G' \cdot B$$

$$\overline{\beta} = \gamma_\beta \left[ \frac{1}{2} |B - G \cdot \overline{J}|^2 + \frac{1}{2} \overline{J}' A \overline{J} + \gamma_{\beta 0} \overline{\tau} \right]^{-1}$$

$$Q_J(J, \beta) = Q_J(J | \beta) Q_\beta(\beta)$$

$$Q_J(J | \beta)$$

$$= \exp \left[ -\frac{1}{2} \beta (J - \overline{J})' \Sigma (J - \overline{J}) + \frac{1}{2} \log |\Sigma| + \frac{1}{2} \tilde{N} \log(\beta / 2\pi) \right]$$

$$Q_\beta(\beta) = \Gamma(\beta | \overline{\beta}, \gamma_\beta)$$

【0 1 4 4】

(2) ハイパーパラメータ期待値、すなわち、パラメータ  $\alpha$ ,  $\tau$  の期待値の計算 (H-ステップの処理)

Mステップに続いて、ハイパーパラメータ  $\alpha$ ,  $\tau$  の期待値の計算を行なう。すなわち、この処理では、 $Q_\alpha$  に関して自由エネルギー  $F(Q)$  を最大化する処理を行なうことになる。

【0 1 4 5】

この手続は以下の式のように表わされる。

【0 1 4 6】

【数 2 2】

$$\overline{\alpha}_n = \gamma_\alpha [\gamma_{\alpha 0} a^{-1} + \frac{1}{2} \overline{\beta} \sum_{d=1}^D \overline{j}_{n,d}^2 + \sum_{d=1}^D (\Sigma^{-1})(n, d; n, d)]^{-1} \quad (n=1, \dots, N)$$

$$\overline{\alpha}_0 = (\gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2}) [\gamma_{\alpha 0} a^{-1} + \frac{1}{2} \overline{\beta} \overline{j}_0^2 + (\Sigma^{-1})(0; 0)]^{-1}$$

$$\overline{\tau} = \gamma_\tau [\gamma_{\tau 0} \overline{\tau}_0^{-1} + \gamma_{\beta 0} \overline{\beta}]^{-1}$$

$$Q_\alpha(\alpha, \tau) = \Gamma(\tau | \overline{\tau}, \gamma_\tau) \Gamma(\alpha_0 | \overline{\alpha}_0, \gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2}) \prod_{n=1}^N \Gamma(\alpha_n | \overline{\alpha}_n, \gamma_\alpha)$$

【0 1 4 7】

(3) 自由エネルギーの計算

以上説明したようなMステップおよびHステップに基づいて計算された $Q_J$ および $Q_\alpha$ を用いて、自由エネルギーを以下のようにして計算する。

【0 1 4 8】

【数 23】

$$F = LP + H_J + H_\beta + H_\alpha + H_\tau$$

$$LP = -\frac{1}{2} \overline{\beta} |B - G \cdot J|^2 - \frac{1}{2} \text{Tr} \Sigma^{-1} \Sigma_a + \frac{1}{2} (I \cdot C) (\langle \log \beta \rangle - \log 2\pi)$$

$$\langle \log \beta \rangle = \log \overline{\beta} + \psi(\gamma_\beta) - \log \gamma_\beta$$

$$\psi(\gamma) \equiv \frac{d(\log \Gamma(\gamma))}{d\gamma} \quad \psi: \text{ダイガンマ関数}$$

$$H_J = -\frac{1}{2} [\text{Tr} \Sigma^{-1} A - \log |\Sigma^{-1} A| - \tilde{N}] - \frac{1}{2} \overline{\beta} J^T A J$$

$$H_\beta = \Phi(\gamma_\beta, \gamma_{\beta 0}) + \gamma_{\beta 0} [\langle \log \beta \rangle + \langle \log \tau \rangle - \overline{\tau} \overline{\beta} + 1]$$

$$\langle \log \tau \rangle = \log \overline{\tau} + \psi(\gamma_\tau) - \log \gamma_\tau$$

$$\Phi(\gamma, \gamma_0) \equiv (\log \Gamma(\gamma) - \gamma \psi(\gamma) + \gamma) - (\log \Gamma(\gamma_0) - \gamma_0 \log \gamma_0 + \gamma_0)$$

$$H_\tau = \Phi(\gamma_\tau, \gamma_{\tau 0}) + \gamma_{\tau 0} [\langle \log \tau \rangle - \log \overline{\tau}_0 - \overline{\tau} \overline{\tau}_0^{-1} + 1]$$

$$H_\alpha = \sum_{n=1}^N [\Phi(\gamma_\alpha, \gamma_{\alpha 0}) + \gamma_{\alpha 0} (\langle \log \alpha_n \rangle - \log a - \overline{\alpha}_n a^{-1} + 1)] \\ + \Phi(\gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2}, \gamma_{\alpha 0}) + \gamma_{\alpha 0} (\langle \log \alpha_0 \rangle - \log a - \overline{\alpha}_0 a^{-1} + 1)$$

$$\langle \log \alpha_n \rangle = \log \overline{\alpha}_n + \psi(\gamma_\alpha) - \log \gamma_\alpha \quad (n=1, \dots, N)$$

$$\langle \log \alpha_0 \rangle = \log \overline{\alpha}_0 + \psi(\gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2}) - \log(\gamma_{\alpha 0} + \frac{1}{2})$$

【0149】

このようにして、自由エネルギーFの値が収束するまで、上述したMステップの処理から自由エネルギーの計算までの処理を繰返す。収束後の自由エネルギーF(Q)の値が、対数周辺尤度  $\log P(B|M)$  の近似値を与える。

【0150】

また、対数モデル事後確率は、 $\log P(B|M)$  と定数分だけの違いしかないので、モデル事後確率が最大になるモデルは、上述したような近似の下では自由エネルギーが最大になるモデルに等しいことになる。

【0151】

以上のような手続により、深さ  $R_k$  に対する事後確率を求めることができる。

これに応じて、上述した図 5 中のステップ S 2 0 4 および S 2 0 6 の処理を行なうことにより、各局所面に局在化された電流源の候補を求めることができる。

【0 1 5 2】

(I I - 2) 最も脳表面に近い電流源の特定

次に、図 4 のステップ S 1 0 6 の処理、すなわち、以上のようにして求められた電流源の候補から、まず、最も脳表面に近い電流源の特定を行なう処理について説明する。

【0 1 5 3】

図 6 は、最も脳表面に近い電流源の特定を行なう処理を説明するためのフローチャートである。

【0 1 5 4】

まず、初期値として変数  $l$  の値を 1 とする (ステップ S 3 0 2)。つづいて、変数  $l$  と、変数  $l$  のとり得る最大値  $L$  との比較が行われ (ステップ S 3 0 4)、変数  $l$  が最大値  $L$  以下であれば、処理はステップ S 3 0 6 に移行し、変数  $l$  が最大値  $L$  を超えていれば、処理はステップ S 3 2 4 に移行する (ステップ S 3 0 4)。すなわち、ステップ S 3 0 6 から S 3 2 2 までの処理を、 $l = 1$  から  $L$  まで繰返す。

【0 1 5 5】

ステップ S 3 0 6 では、1 番目の局所面以外の局所面の深さを図 5 のステップ S 2 0 4 で求められた深さ  $R_M$  に固定する。

【0 1 5 6】

変数  $k$  の値を 1 とする (ステップ S 3 0 8)。つづいて、変数  $k$  と、変数  $k$  のとり得る最大値  $K$  との比較が行われ (ステップ S 3 1 0)、変数  $k$  が最大値  $K$  以下であれば、処理はステップ S 3 1 2 に移行し、変数  $k$  が最大値  $K$  を超えていれば、処理はステップ S 3 2 0 に移行する。

【0 1 5 7】

ステップ S 3 1 2 では、1 番目の局所面の深さをまず  $R_k$  とする。

次に、 $L$  個の局所面の集合に対して電流分布の推定を行なう (ステップ S 3 1 4)。

【0158】

さらに、この局所面配置に対する事後確率（自由エネルギー）を求める（ステップS316）。変数 $k$ の値を1だけインクリメントして（ステップS318）、処理はステップS310に復帰する。

【0159】

このようにして、 $k=1$ から $k=K$ までの深さの各局所面についての処理を行った後、事後確率が最大になる1番目の局所面の深さ $R_M(1)$ を求める（ステップS320）。変数 $l$ の値を1だけインクリメントして（ステップS322）、処理はステップS304に復帰する。

【0160】

このようにして、各変数 $l$ について求めた局所面の深さ $R_M(1)$ の中で、最も脳表面に近い（浅い） $l$ を求め、これを $l_1$ とする（ステップS324）。

【0161】

以上の処理により、 $l_1$ 番目の局所面が最も脳表面に近い電流源に対応し、その深さの初期推定値が $R_M(l_1)$ として求められ、処理が終了する（ステップS326）。

【0162】

（II-3） 各局所面に対応する電流源の深さの特定

図7および図8は、図4のステップS108の処理、すなわち、各局所面に対応する電流源の深さの特定処理を説明するためのフローチャートである。

【0163】

図7を参照して、初期値として変数 $s$ の値を1とする（ステップS402）。つづいて、変数 $s$ と、変数 $s$ のとり得る最大値 $L$ との比較が行われ（ステップS404）、変数 $s$ が最大値 $L$ 未満であれば、処理はステップS406に移行し、変数 $s$ が最大値 $L$ 以上であれば、処理はステップS434に移行する（ステップS404）。すなわち、ステップS406からS432までの処理を、 $s=1$ から $L$ まで繰返す。

【0164】

ステップS406では、これまでに特定された局所面の深さを $\{R_M(l_1)$ ,

...,  $R_M(1_s)$  } とするとき、これらの局所面の深さを、それぞれ  $\{R_M(1_1), \dots, R_M(1_s)\}$  に固定する (ステップ S 4 0 6)。

【0 1 6 5】

まず、 $l$  が  $\{1_1, \dots, 1_s\}$  のいずれとも等しくなく、かつ  $l$  は  $\{1, \dots, L\}$  の集合に属しているものとする (ステップ S 4 0 8)。次に、変数  $l$  の値として、可能な値を全て尽くしたか否かを判断し (ステップ S 4 1 0)、全て尽くしている場合は処理はステップ S 4 3 0 に移行する。一方、全てを尽くしていない場合は、処理はステップ S 4 1 2 に移行する。

【0 1 6 6】

ステップ S 4 1 2 では、 $l$  番目の局所面以外で、かつ  $\{1_1, \dots, 1_s\}$  でもない局所面の深さを  $R_M$  に固定する。

【0 1 6 7】

変数  $k$  の値を 1 とする (ステップ S 4 1 4)。つづいて、変数  $k$  と、変数  $k$  のとり得る最大値  $K$  との比較が行われ (ステップ S 4 1 6)、変数  $k$  が最大値  $K$  以下であれば、処理はステップ S 4 1 8 に移行し、変数  $k$  が最大値  $K$  を超えていれば、処理はステップ S 4 2 6 に移行する。すなわち、ステップ S 4 1 8 から S 4 2 4 までの手続を、 $k = 1$  から  $k = K$  まで繰返す。

【0 1 6 8】

ステップ S 4 1 8 では、 $l$  番目の局所面の深さを  $R_k$  にする。

次に、 $L$  個の局所面の集合に対して電流分布推定を行なう (ステップ S 4 2 0)。

【0 1 6 9】

さらに、この局所面配置に対する事後確率 (自由エネルギー) を求める (ステップ S 4 2 2)。

【0 1 7 0】

図 8 を参照して、ステップ S 4 2 6 では、以上のようにして  $k = K$  までの処理が終わった後に、事後確率が最大になる  $l$  番目の局所面の深さ  $R_M(1)$  を求める (ステップ S 4 2 6)。

【0 1 7 1】

$\{1_1, \dots, 1_s\}$  のいずれとも等しくなく、かつ  $\{1, \dots, L\}$  の集合に属している、まだ処理を行っていない他の変数  $1$  を選択し（ステップ S428）、ステップ S410 に復帰する。

【0172】

以上の手続により、処理を行った全ての変数  $1$  に対応する  $R_M(1)$  の中で、脳表面に最も近い  $1$  を求め、これを  $1_{s+1}$  とする（ステップ S430）。

【0173】

さらに、 $s$  に  $s+1$  を代入し（ステップ S432）、処理はステップ S404 に復帰する。

【0174】

全ての可能な  $s$  について処理が終了することで、各局所面に対応する電流源の深さの特定が終了する（ステップ S434）。

【0175】

(II-4) 分解能を上げて電流源の再推定

図9および図10は、図4のステップS110の処理、すなわち、空間分解能を上げて電流源の位置を再推定する処理を説明するためのフローチャートである。

【0176】

図9および図10を参照して、まず、初期分解能を用いて推定した電流源と対応する局面の番号を脳表面に近いものから  $1, 2, 3, \dots, L$  となるように番号の並べ替えを行なう（ステップ S502）。次に、各局所面での電流分布の拡がりに対応して局所面を小さくする（ステップ S504）。

【0177】

図4のステップS108までの処理で求めた局所面の深さ  $R_M(1)$  を  $R_M^{\text{old}}(1)$  とする（ステップ S506）。

【0178】

新しい深さ方向の分解能と探索幅を、それぞれ  $\Delta R$  および  $(K_L \cdot \Delta R)$  とする。また局所面上での格子点の分解能も上げる（ステップ S508）。

【0179】

初期値として変数  $l$  の値を 1 とする (ステップ S 5 1 0)。つづいて、変数  $l$  と、変数  $l$  のとり得る最大値  $L$  との比較が行われ (ステップ S 5 1 2)、変数  $l$  が最大値  $L$  以下であれば、処理はステップ S 5 1 4 に移行し、変数  $l$  が最大値  $L$  を超えていれば、処理はステップ S 5 3 4 に移行する (ステップ S 5 1 2)。すなわち、ステップ S 5 1 4 から S 5 3 2 までの処理を、 $l = 1$  から  $l = L$  まで繰返す。

## 【0180】

ステップ S 5 1 4 では、 $l$  番目以外の局所面  $l'$  の深さを  $R_M^{\text{old}}(l')$  に固定する。

## 【0181】

その上で、さらに、 $k = 0, \pm 1, \dots, \pm K_L$  について、以下のステップ S 5 1 8 からステップ S 5 2 6 までの処理を行なう。

## 【0182】

まず、変数  $k$  の値を 0 とする (ステップ S 5 1 6)。つづいて、変数  $k$  の絶対値と、変数  $k$  の絶対値のとり得る最大値  $K_L$  との比較が行われ (ステップ S 5 1 8)、変数  $k$  の絶対値が最大値  $K_L$  以下であれば、処理はステップ S 5 2 0 に移行し、変数  $k$  の絶対値が最大値  $K_L$  を超えていれば、処理はステップ S 5 2 8 に移行する (ステップ S 5 1 8)。

## 【0183】

ステップ S 5 2 0 では、 $l$  番目の局所面の深さを  $(R_M^{\text{old}}(l) + k \cdot \Delta R)$  とする。

## 【0184】

次に、 $L$  個の局所面の集合に対して、現在の分解能を用いて、電流分布推定を行なう (ステップ S 5 2 2)。

## 【0185】

さらに、この局所面配置に対する事後確率 (自由エネルギー) を求める (ステップ S 5 2 4)。その上で、 $k$  の値を  $\{\pm 1, \dots, \pm K_L\}$  のうちの次の値とし、処理はステップ S 5 1 8 に復帰する。

## 【0186】



以上のような処理が $k = \pm K_L$ まで行なわれた後に、ステップS528では、事後確率が最大となる $k$ を求め、これを $k_M$ とする。

【0187】

その上で、 $R_M^{\text{old}}(1)$ に $R_M^{\text{old}}(1) + k_M \cdot \Delta R$ を代入する（ステップS530）。変数1の値を1だけインクリメントして（ステップS532）、処理はステップS512に復帰する。

【0188】

以上のような処理が変数1の値が最大値Lとなるまで行われた時点で、分解能が最終分解能に達していれば（ステップS534）、処理を終了する（ステップS538）。

【0189】

一方、分解能が最終分解能に達していなければ（ステップS534）、局所面上での格子点の分解能と深さ方向の分解能を上げて（ステップS536）、処理は、ステップS510に復帰する。

【0190】

以上説明したような「脳内電流源推定方法」を用いれば、MEG（またはEEG）の観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することが可能となる。さらに、このような深さ方向の推定は、複数の電流源が存在する場合にも適用可能である。しかも、電流源が電流双極子のように局在している場合にも、広がりを持つ電流源の場合にも適用できるだけでなく、電流源の広がり具合を推定することも可能である。

【0191】

また、図9および図10で説明したような処理を、初期分解能での推定の後に追加して行えば、位置の推定分解能を逐次的に上げることが可能となる。このことは、また、生理学的な知見などにより探索範囲を限定して調べることが可能なことも意味する。

【0192】

〔シミュレーション結果〕

以下では、以上説明した脳内電流源推定方法に従って、モデル的に仮定した電

流源位置を推定するシミュレーションを行なった結果について説明する。

【0193】

図11は、人間の脳を、半径10.0（任意単位）の半球状であると仮定し、この半球の表面上で観測された動径方向の磁場分布を上面から見た上面図である。

【0194】

図11においては、後に説明するように、中心から半径7.0の位置に、単一の電流源が置かれている場合の半球表面上での磁場分布を示している。以下のシミュレーションでは磁場の観測データにS/N比が0.1のノイズを加えている。

【0195】

図12は、初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す図である。

図12では、図4のステップS102～ステップS104の処理において説明したとおり、初期分解能を用いて電流源の初期推定を行なうために、深さ（半径R）をステップ状に変化させつつ、各深さの半球上において自由エネルギーが最大となるような電流分布を変分法的バイズ法に基づいて算出した結果を示す。

【0196】

図12（a）は半径R5.0の場合を示し、図12（b）は半径R=6.0の場合を示し、図12（c）は半径R=7.0の場合を示す。

【0197】

図13は、さらに、半径がより大きい（脳表面により近く）場合の初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す図である。

【0198】

図13（d）は半径R=7.5の場合であり、図13（e）は半径R=8.0の場合であり、図13（f）は半径R=9.0の場合である。

【0199】

図14は、このように、脳内に想定した様々な深さの仮想半球面に対して、自由エネルギーを最大とするような電流分布を各々求める際に得られる、各仮想半球面上での自由エネルギーの大きさを示す図である。

## 【0200】

図14に示すとおり、半球面全体を仮想曲面として計算した場合、半径 $R=7$ から半径 $R=8$ の間に自由エネルギーの最大点が存在していることがわかる。

## 【0201】

図13(d)に示すとおり、半径 $R=7.5$ の仮想半球面上には、電流分布に1つの極大点が存在する。

## 【0202】

このようにして、初期分解能を用いて電流源が初期推定されたので、自由エネルギーが最大となっている仮想曲面において、電流分布の極大点について、その極大点を含む局所面を求め、さらにこの局所面について電流源の特定処理が行なわれる。

## 【0203】

図15および図16は、このように、電流分布の極大点を含む局所面について、局所面上の格子点の分解能と深さ方向の分解能を上げて、さらに電流源の特定処理を行なった場合の処理を示す図である。

## 【0204】

図15(a)は半径 $R=5.0$ の、図15(b)は半径 $R=6.0$ の、図15(c)は半径 $R=7.0$ の場合の局所面における電流分布を示している。同様に、図16(d)は、半径 $R=7.5$ の、図16(e)は半径 $R=8.0$ の、図16(f)は半径 $R=9.0$ の電流分布をそれぞれ示している。

## 【0205】

図17は、このようにして局所面の深さを変えつつ自由エネルギーを求めた結果を示す図である。

## 【0206】

図17に従えば、局所面を用いて計算した結果の自由エネルギーは、半径 $R=7$ 付近に極大値を持ち、結果から、半径 $R=7$ の位置に1つの電流源が存在していることを特定することが可能である。

## 【0207】

このときの電流源における電流分布は、図15(c)のとおりであり、上述し

たとおり、電流分布も最も拡がりの狭いものとなっていることがわかる。

【 0 2 0 8 】

図 1 8 は、さらに、脳表面を半球と仮定した場合に、電流源が 2 つ脳内に存在する場合の脳表面における磁場分布を示す上面図である。

【 0 2 0 9 】

図 1 8 に示した例においては半径  $R = 6.0$  および  $R = 8.0$  の位置にそれぞれ電流源が置かれているものとする。

【 0 2 1 0 】

図 1 9 および図 2 0 は、初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す図である。

【 0 2 1 1 】

すなわち、図 1 9 および図 2 0 では、2 個の電流源が脳内に存在している場合に、図 4 に示した初期分解能を用いた電流源の初期推定を行なう処理（ステップ S 1 0 4）を説明している。

【 0 2 1 2 】

図 1 9（a）は半径  $R = 5.0$  の場合の、図 1 9（b）は半径  $R = 6.0$  の場合の、図 1 9（c）は半径  $R = 7.0$  の場合の仮想半球面上の電流分布を示している。

【 0 2 1 3 】

図 2 0（d）は、半径  $R = 7.5$  の場合の、図 2 0（e）は半径  $R = 8.0$  の場合の、図 2 0（f）は半径  $R = 9.0$  の場合の仮想半球面上の電流分布をそれぞれ示している。

【 0 2 1 4 】

図 2 1 は、このようにして仮想半球面全体について、各仮想半球面ごとに自由エネルギーが最大となるように電流分布を求めた場合の、自由エネルギーの半径依存性を示す図である。

【 0 2 1 5 】

図 2 1 に示すとおり、半球面全体にわたって自由エネルギーを計算した場合、半径  $R = 7$  から半径  $R = 8$  の間の半径  $7.5$  付近に自由エネルギーの最大値が存在し

ていることがわかる。

【0216】

図20(d)に示すとおり、半径 $R = 7.5$ の仮想半球面上には、電流分布に2つの極大点が存在し、2つの局所面が決定される。

【0217】

次に、図4におけるステップS106の処理に対応する計算結果について説明する。

【0218】

図22および図23は、このようにして、最も脳表面に近い電流源を特定するために、事後確率が最大になる1番目の局所面の深さ $R_M(1)$ を求める処理を説明するための図である。

【0219】

したがって、図22および図23は、半球面全体にわたって計算した自由エネルギーが最大となる面上に他方の局所面を固定したままで、一方の電流源に対応する局所面を移動させた場合の電流分布を示す図である。

【0220】

図22(a)は半径 $R = 5.0$ の場合の、図22(b)は半径 $R = 6.0$ の場合の、図22(c)は半径 $R = 7.0$ の場合の局所面上の電流分布を示している。

【0221】

図23(d)は、半径 $R = 7.5$ の場合の、図23(e)は半径 $R = 8.0$ の場合の、図23(f)は半径 $R = 9.0$ の場合の局所面上の電流分布をそれぞれ示している。

【0222】

図24は、図22および図23で示したように仮想局所面を移動させた場合の自由エネルギーの局所面位置(半径)依存性を示す図である。

【0223】

図24に示すとおり、半球面全体にわたって計算した自由エネルギーが最大となる面上に他方の局所面を固定したままで、一方の電流源に対応する局所面を半径

$R = 8$  の位置にしたときに、自由エネルギーが最大となる。

【 0 2 2 4 】

したがって、図 2 4 に示した結果から、最も脳表面に近い電流源の位置としては、半径  $R = 8.0$  の位置であることがわかる。

【 0 2 2 5 】

続いて、他方の側の電流源の深さの特定を行なう。

この場合、一方の電流源に対応する局所面の深さは、半径  $R = 8.0$  に固定しておき、他方の電流源に対応する局所面の深さを変化させていく。

【 0 2 2 6 】

図 2 5 および図 2 6 は、特定された面上に一方の局所面を固定したままで、他方の電流源に対応する局所面を移動させた場合の電流分布を示す図である。

【 0 2 2 7 】

図 2 5 (a) は半径  $R = 5.0$  の場合の、図 2 5 (b) は半径  $R = 5.5$  の場合の、図 2 5 (c) は半径  $R = 6.0$  の場合の局所面上の電流分布を示している。

【 0 2 2 8 】

図 2 6 (d) は、半径  $R = 6.5$  の場合の、図 2 6 (e) は半径  $R = 7.0$  の場合の、図 2 6 (f) は半径  $R = 7.5$  の場合の局所面上の電流分布をそれぞれ示している。

【 0 2 2 9 】

図 2 7 は、図 2 5 および図 2 6 で示したように仮想局所面を移動させた場合の自由エネルギーの局所面位置（半径）依存性を示す図である。

【 0 2 3 0 】

図 2 7 に示すとおり、この場合半径  $R = 6$  の位置で自由エネルギーが極大となることがわかる。

【 0 2 3 1 】

このような処理により、2つの電流源が脳内に存在している場合も、各々の電流源の深さを特定することが可能であることがわかる。

【 0 2 3 2 】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【0233】

【発明の効果】

以上説明したとおり、本発明の脳内電流源推定方法に従えば、MEGやEEGの観測データから脳内電流源の位置を深さ方向まで含めて推定することが可能である。しかも、このような深さ方向の推定は、複数の電流源が存在する場合にも適用可能である。さらに、電流源が電流双極子のように局在している場合にも、広がりを持つ電流源の場合にも適用できるだけでなく、電流源の広がり具合を推定することも可能である。また、初期分解能での推定の後に、位置の推定分解能を逐次的に上げる処理を追加して行うことが可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】 脳磁計システムの構成の一例を示す概念図である。

【図2】 電流源が作る電磁場を適当な曲面上で観測している場合の概念図である。

【図3】 脳内の電流源と複数の仮想曲面との関係を示す概念図である。

【図4】 本発明の脳内電流源推定方法の手順の全体的な流れを示すフローチャートである。

【図5】 初期分解能を用いた電流源の初期推定の処理を説明するためのフローチャートである。

【図6】 最も脳表面に近い電流源の特定を行なう処理を説明するためのフローチャートである。

【図7】 各局所面に対応する電流源の深さの特定処理を説明するための第1のフローチャートである。

【図8】 各局所面に対応する電流源の深さの特定処理を説明するための第2のフローチャートである。

【図9】 空間分解能を上げて電流源の位置を再推定する処理を説明するた

めの第1のフローチャートである。

【図10】 空間分解能を上げて電流源の位置を再推定する処理を説明するための第2のフローチャートである。

【図11】 人間の脳を半球状であると仮定し、この半球の表面上で観測された磁場分布を上面から見た上面図である。

【図12】 初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す図である。

【図13】 半径がより大きい（脳表面により近く）場合の初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す図である。

【図14】 自由エネルギーを最大とするような電流分布を各々求める際に得られる、各仮想半球面上での自由エネルギーの大きさを示す図である。

【図15】 極大点を含む局所面についてさらに電流源の特定処理を行なった場合の処理を示す第1の図である。

【図16】 極大点を含む局所面についてさらに電流源の特定処理を行なった場合の処理を示す第2の図である。

【図17】 局所面の深さを変えつつ自由エネルギーを求めた結果を示す図である。

【図18】 脳表面を半球と仮定した場合に、電流源が2つ脳内に存在する場合の脳表面における磁場分布を示す上面図である。

【図19】 初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す第1の図である。

【図20】 初期分解能を用いた電流源の初期推定結果を示す第2の図である。

【図21】 各仮想半球面ごとに自由エネルギーが最大となるように電流分布を求めた場合の、自由エネルギーの半径依存性を示す図である。

【図22】 最も脳表面に近い電流源を特定するために、事後確率が最大になる1番目の局所面の深さを求める処理を説明するための第1の図である。

【図23】 最も脳表面に近い電流源を特定するために、事後確率が最大になる1番目の局所面の深さを求める処理を説明するための第2の図である。

【図24】 仮想局所面を移動させた場合の自由エネルギーの局所面位置（



半径) 依存性を示す図である。

【図 2 5】 特定された面上に一方の局所面を固定したままで、他方の電流源に対応する局所面を移動させた場合の電流分布を示す第 1 の図である。

【図 2 6】 特定された面上に一方の局所面を固定したままで、他方の電流源に対応する局所面を移動させた場合の電流分布を示す第 2 の図である。

【図 2 7】 仮想局所面を移動させた場合の自由エネルギーの局所面位置 (半径) 依存性を示す図である。

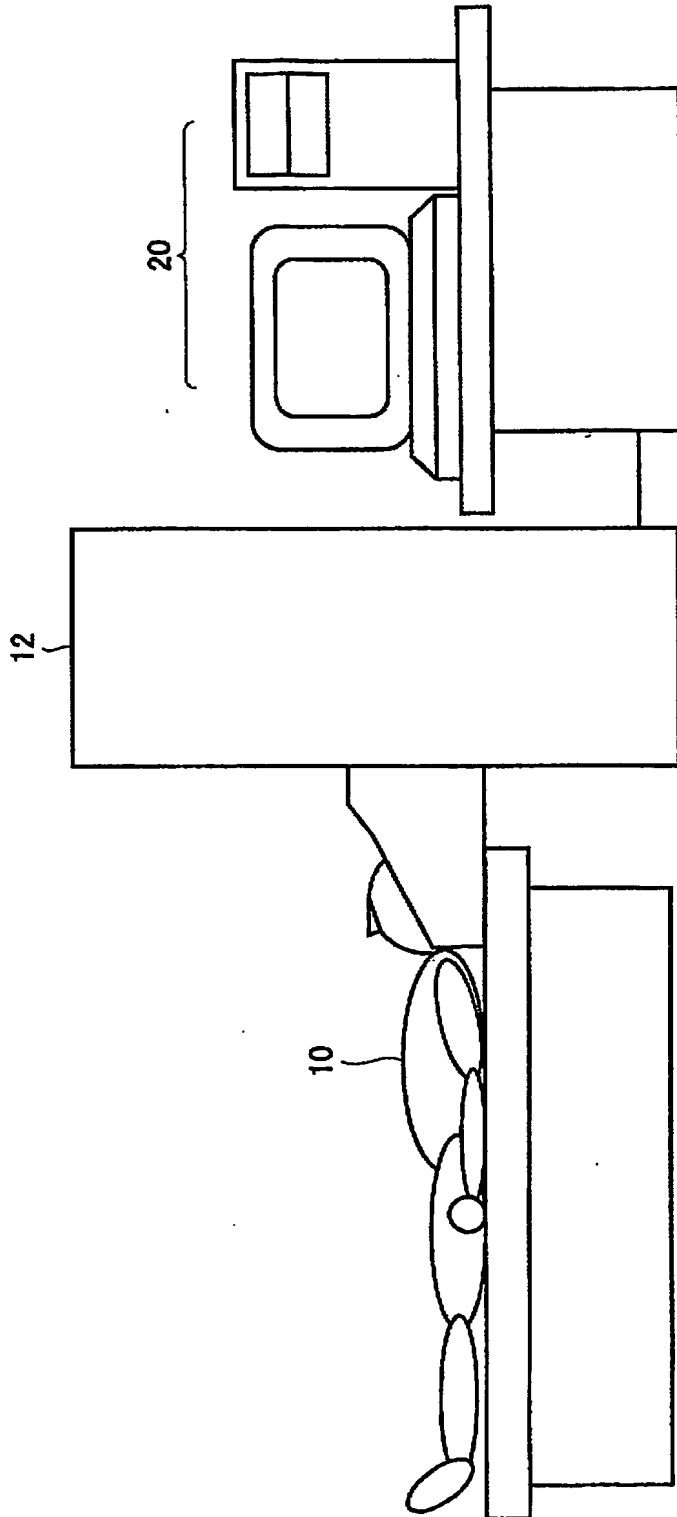
【符号の説明】

1 0、被験者、1 2 脳磁計、2 0 コンピュータシステム。

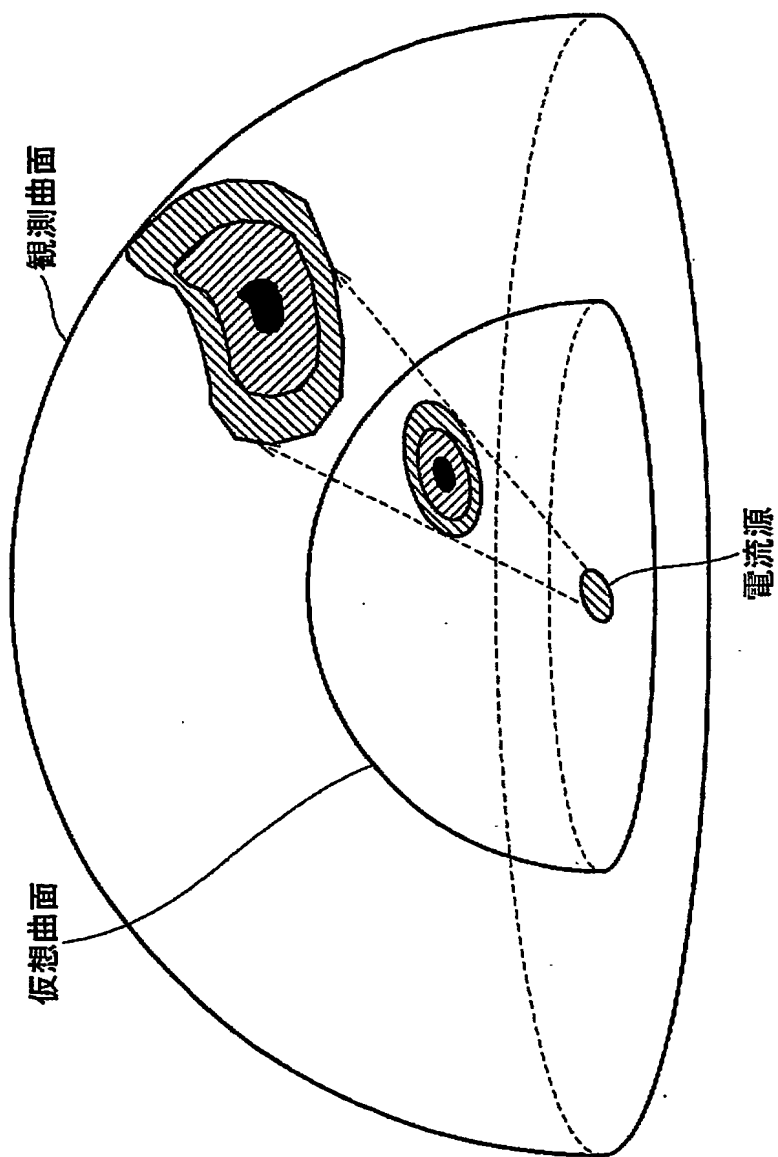
【書類名】

図面

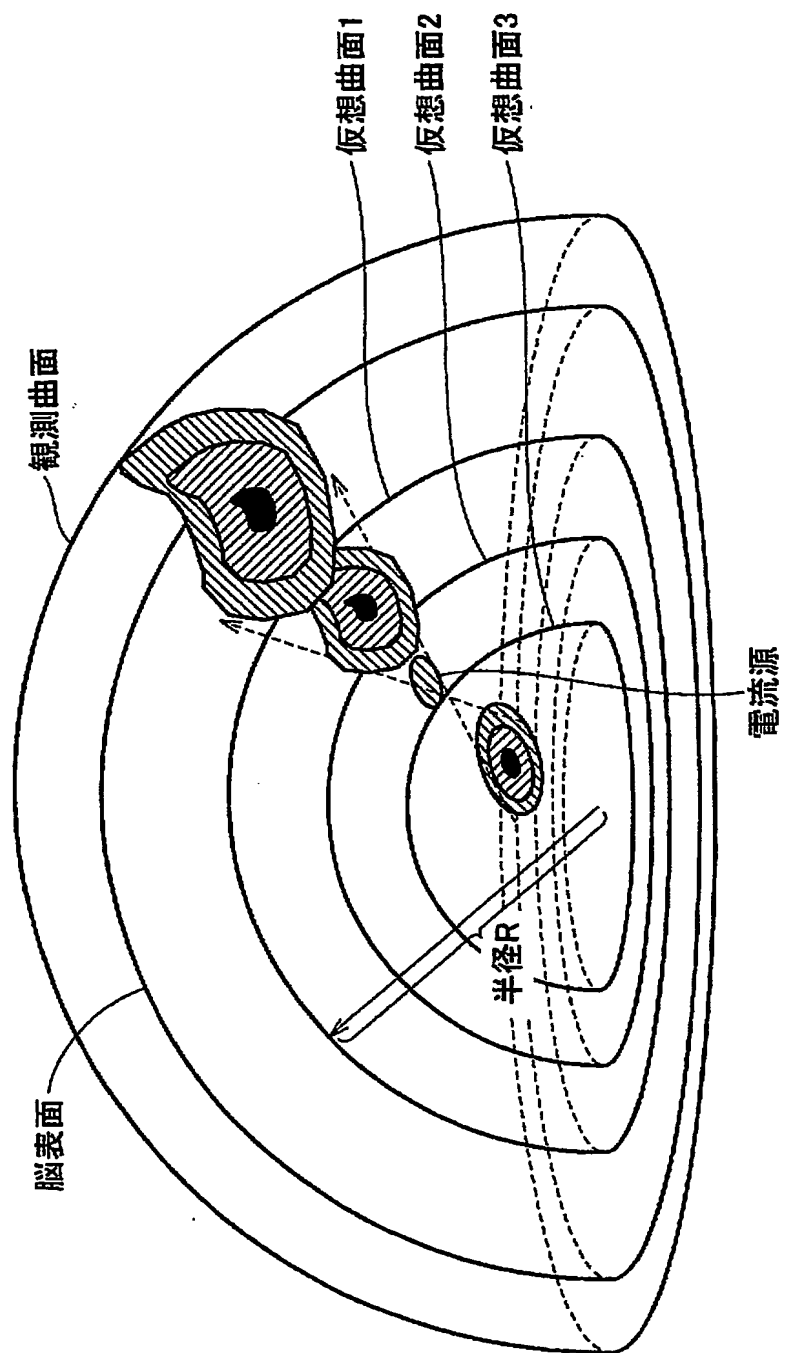
【図 1】



【図 2】

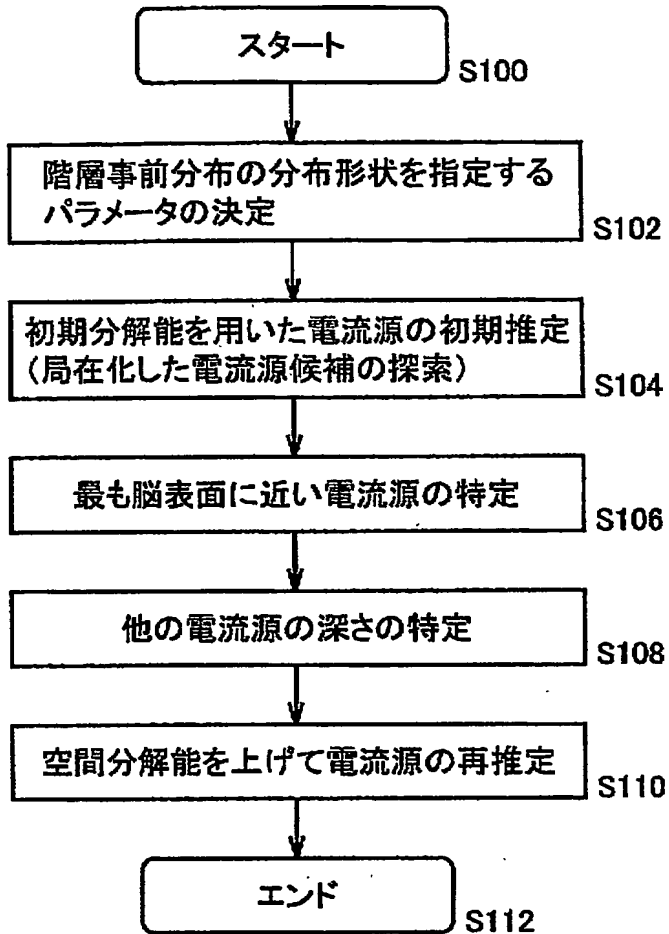


【图3】



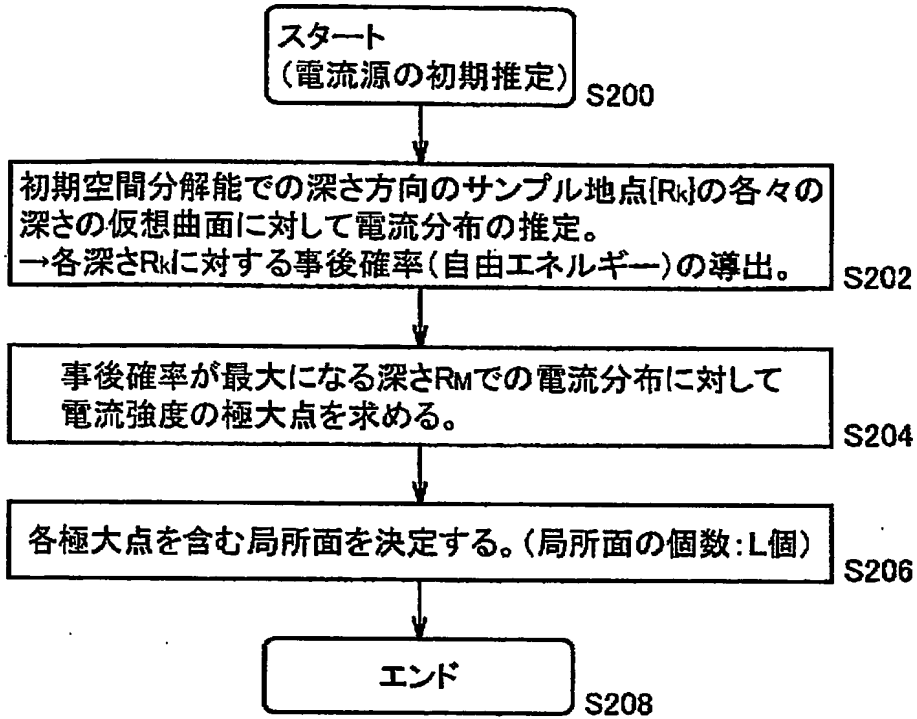
【図 4】

電流源推定



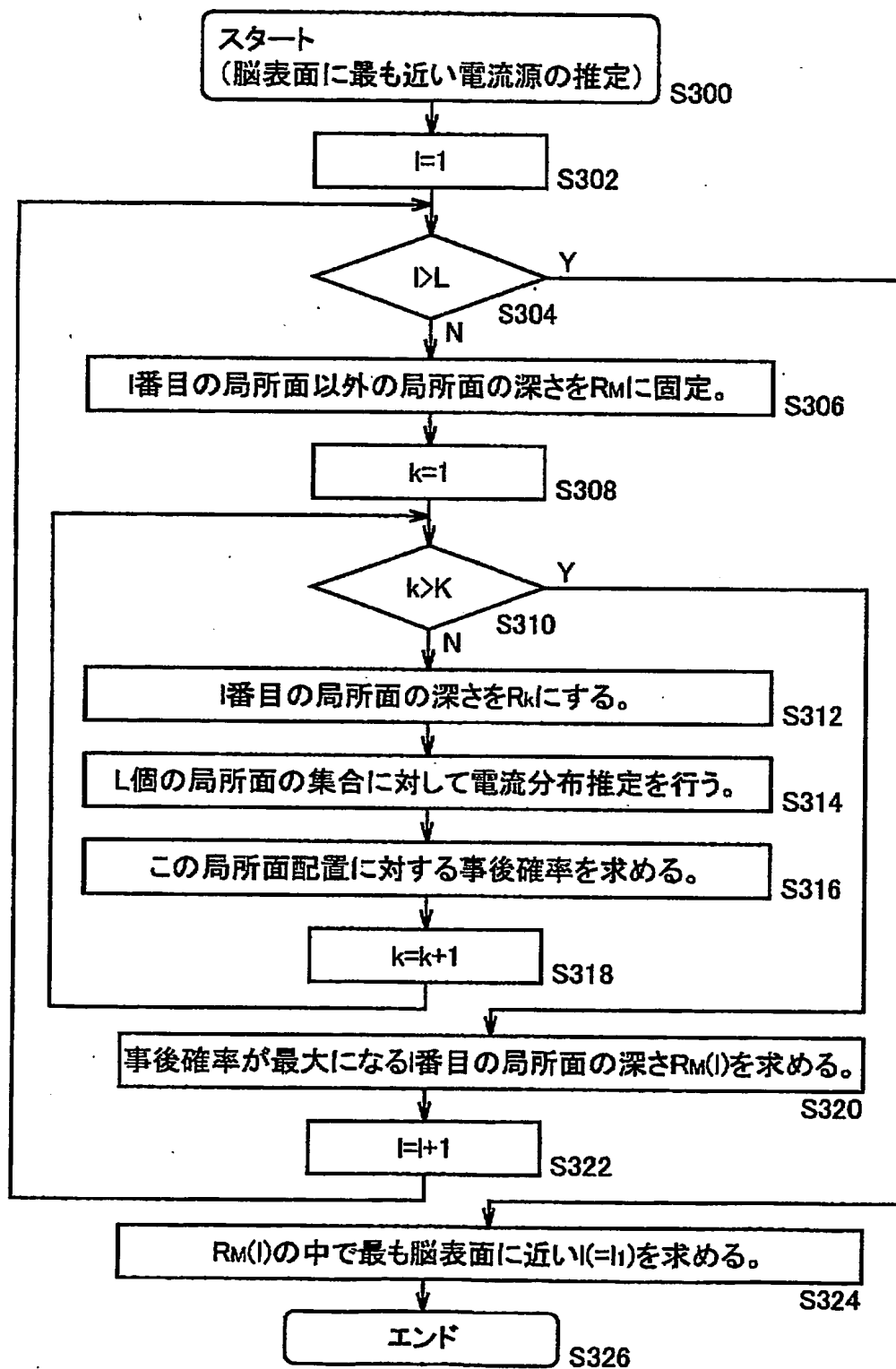
【図 5】

電流源の初期推定

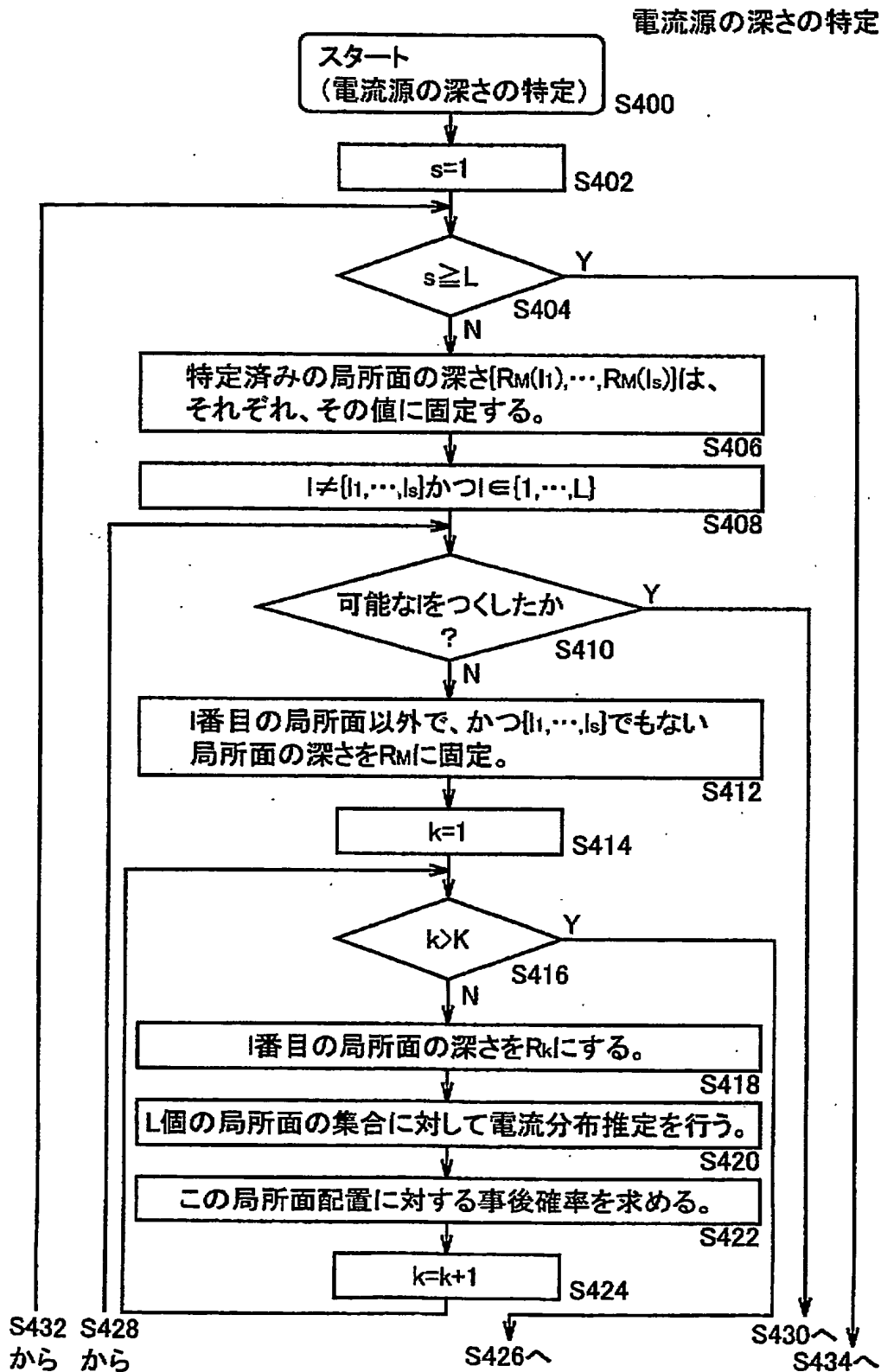


【図 6】

脳表面に最も近い電流源の推定

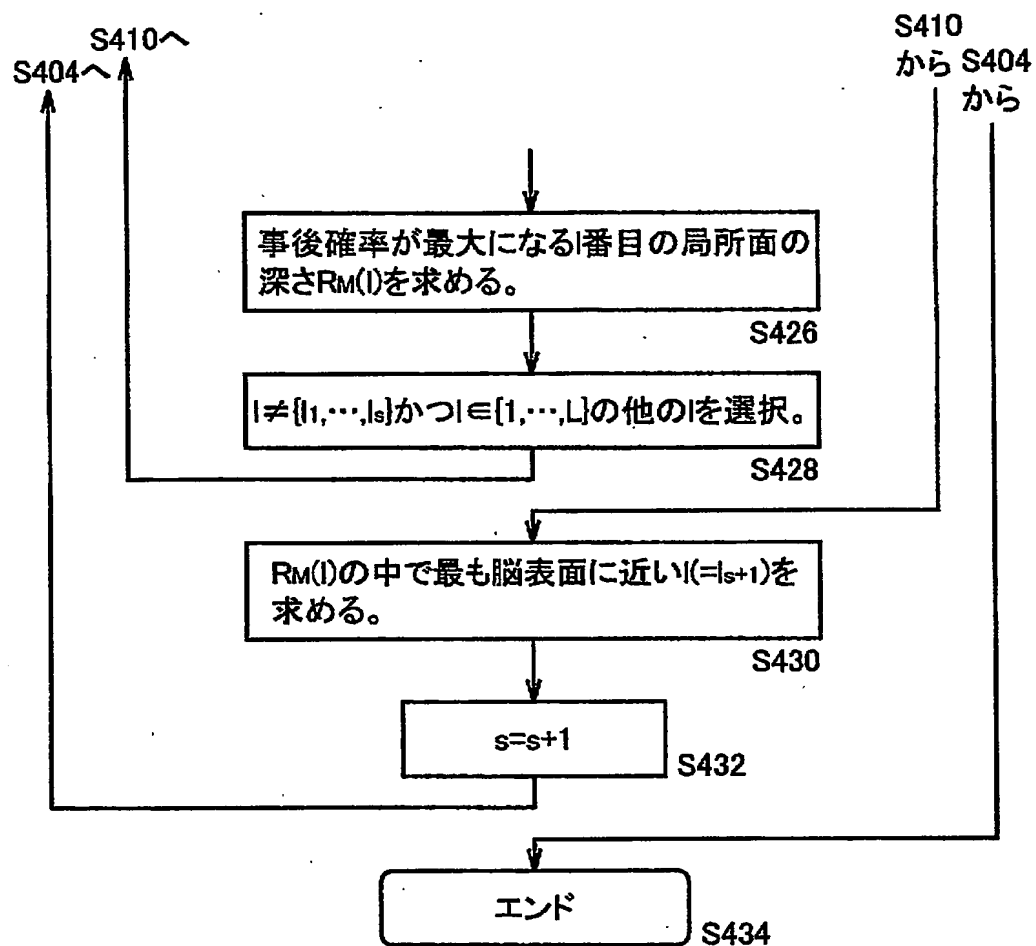


【図 7】

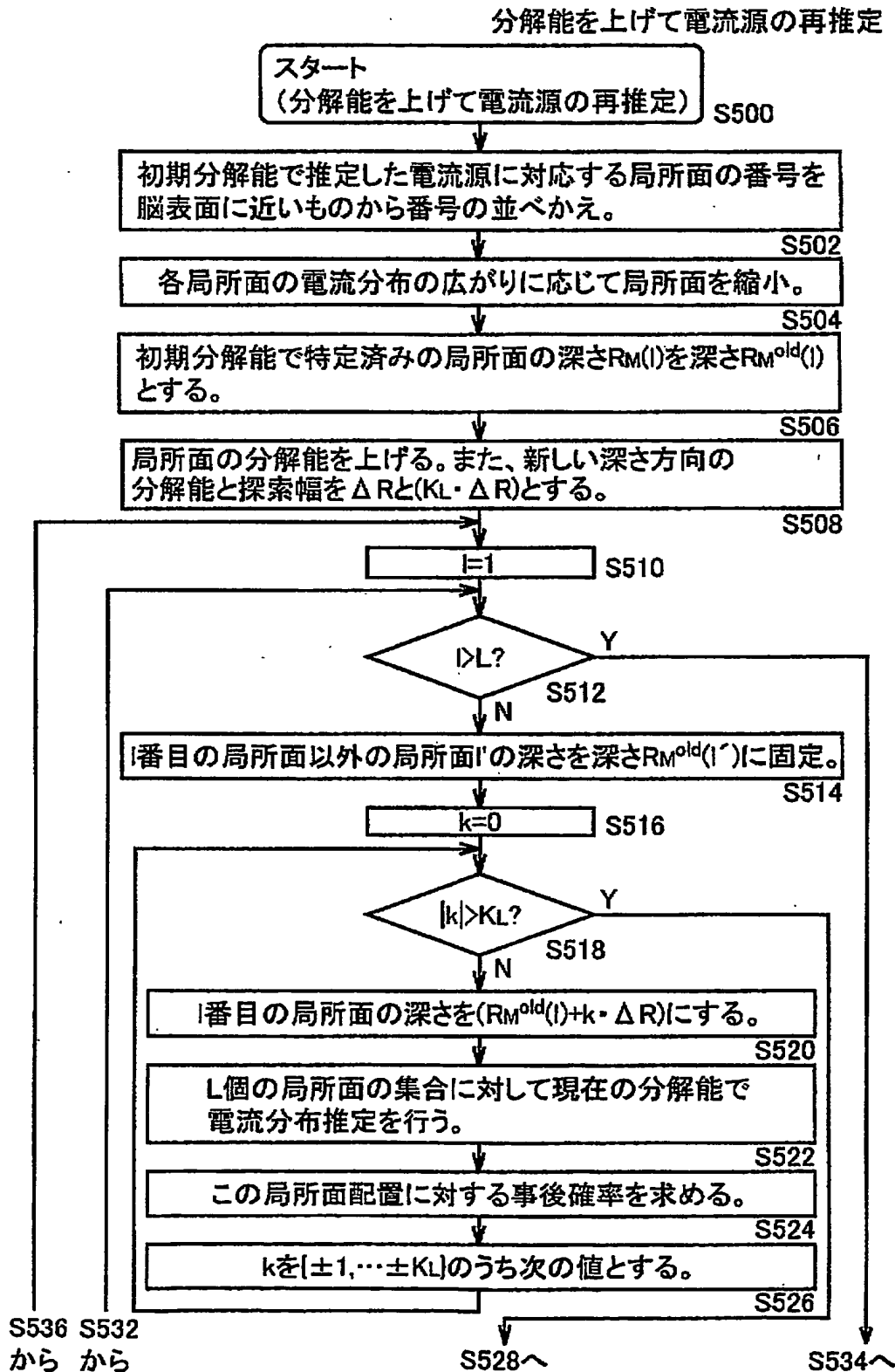




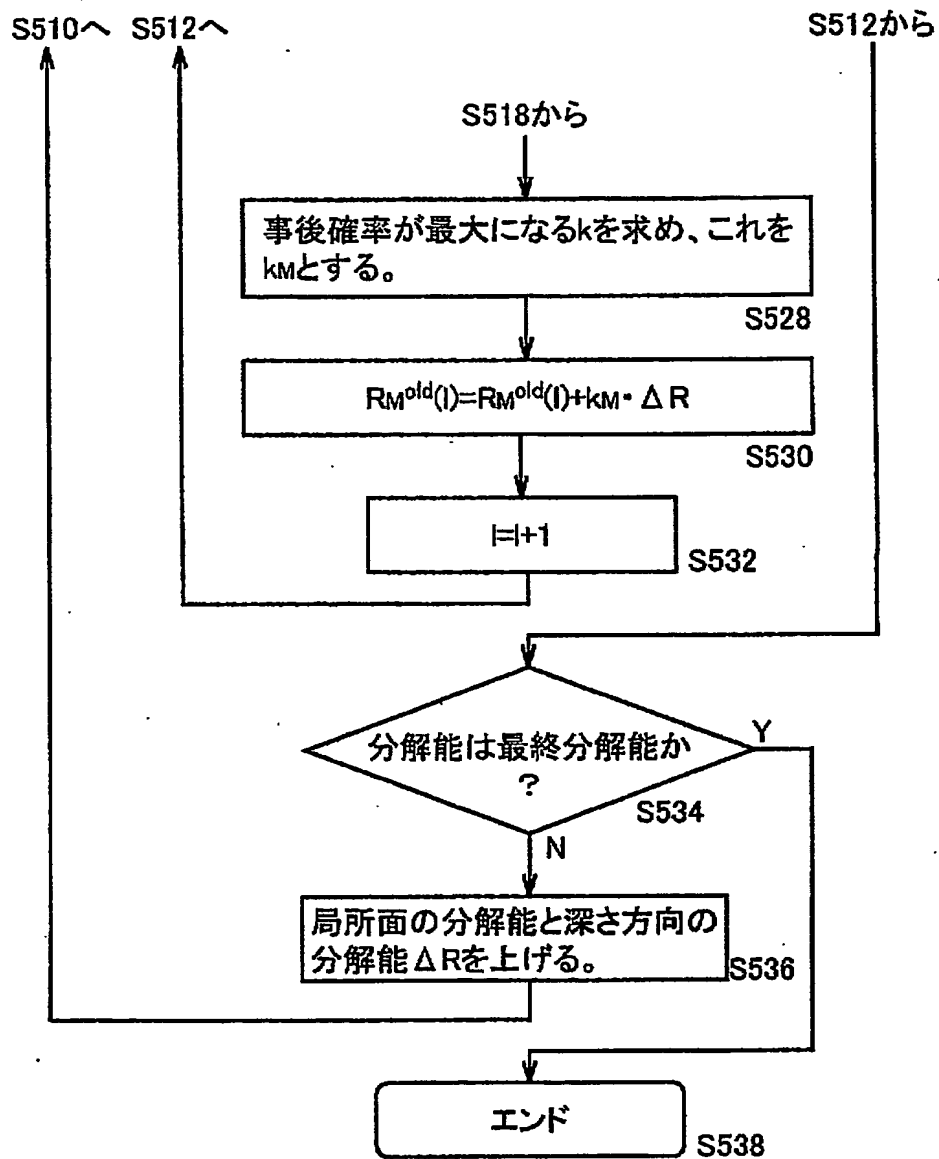
【図 8】



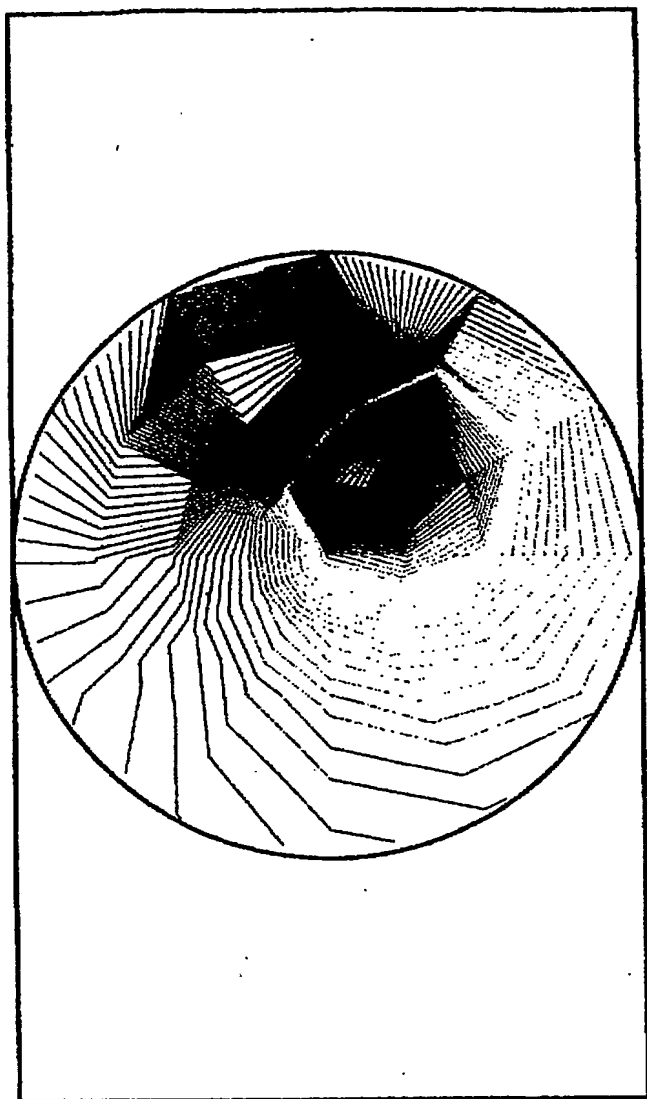
【図 9】



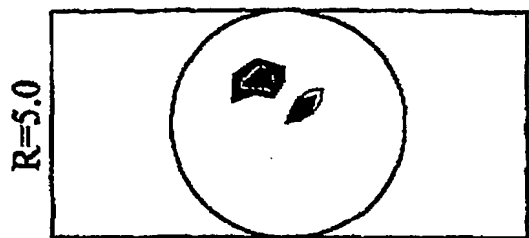
【図10】



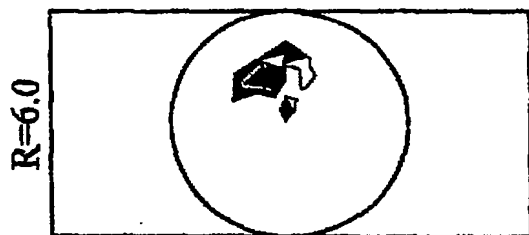
【図 11】



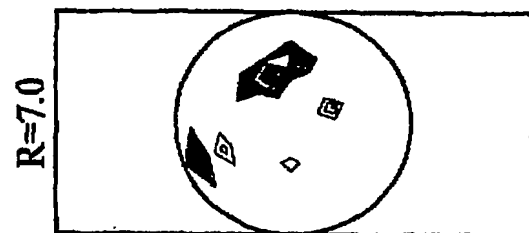
【図 12】



(a)

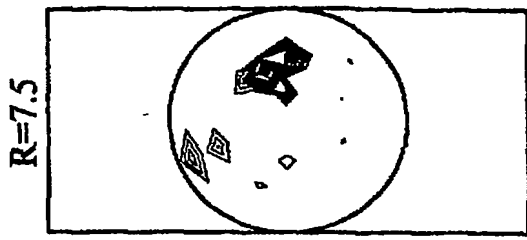


(b)

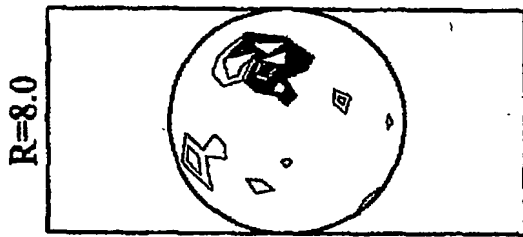


(c)

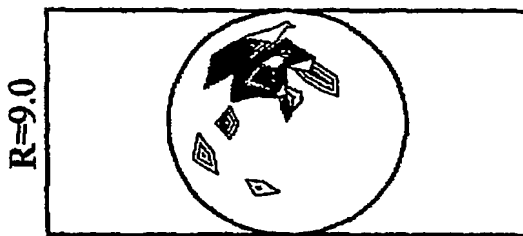
【図 13】



(d)

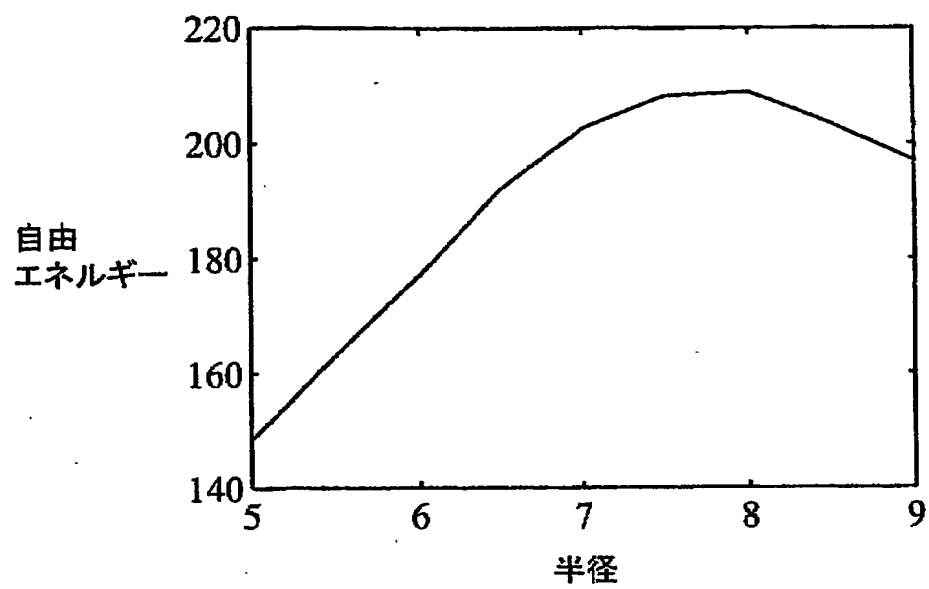


(e)

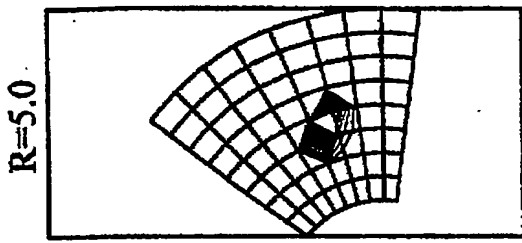


(f)

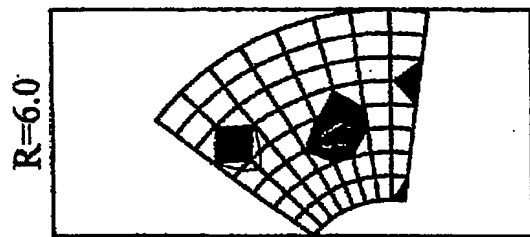
【図 1 4】



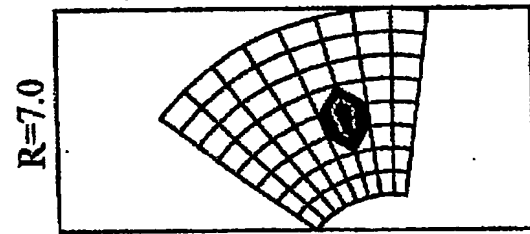
【図 1 5】



(a)



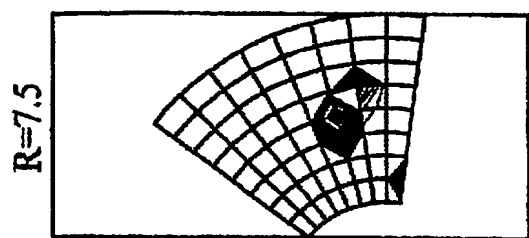
(b)



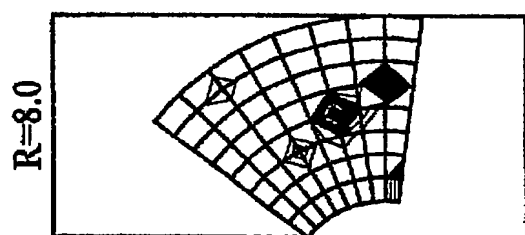
(c)



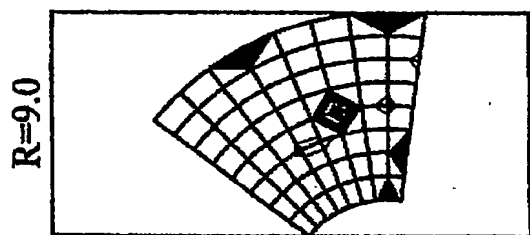
【図 1 6】



(d)

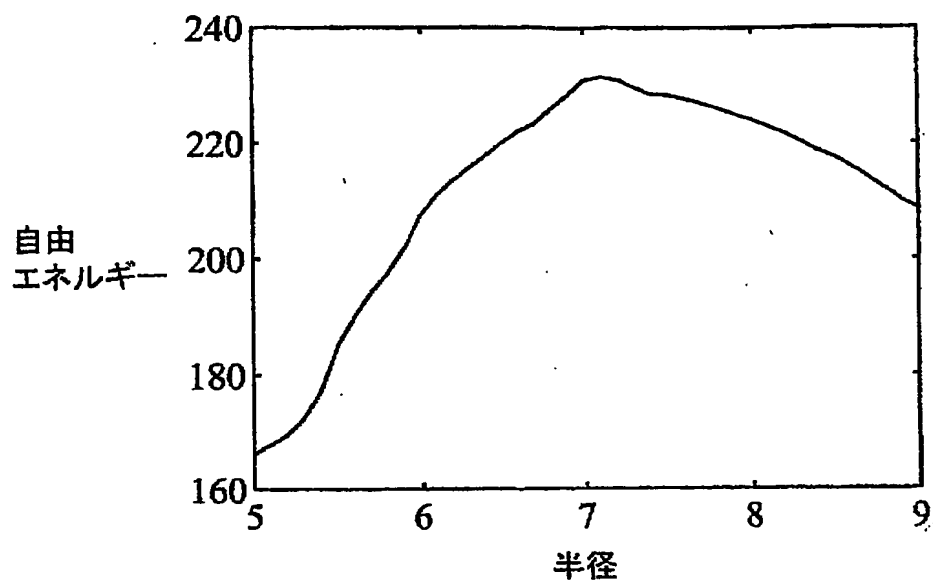


(e)

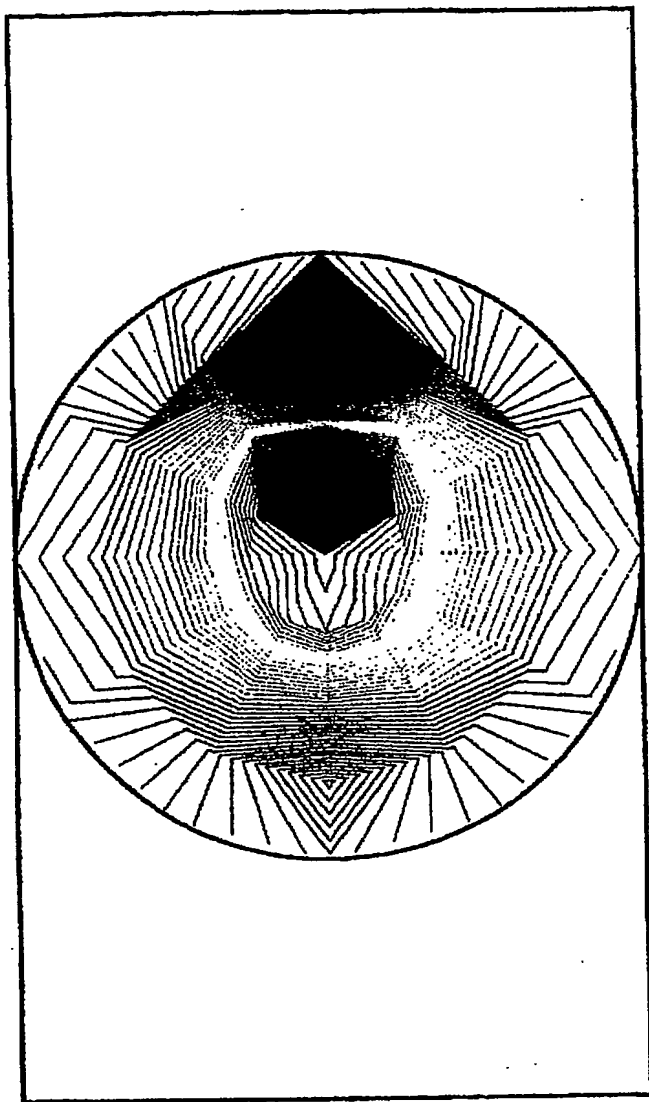


(f)

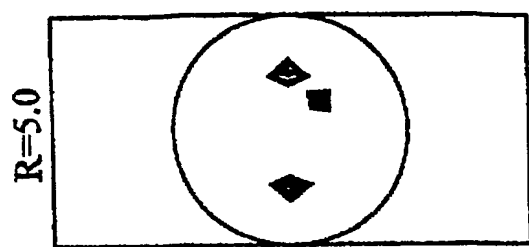
【図 17】



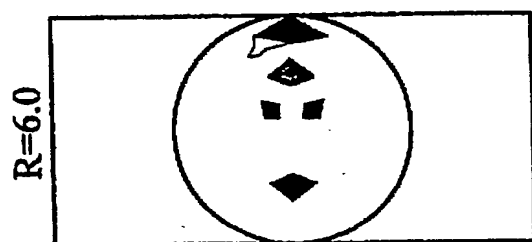
【図18】



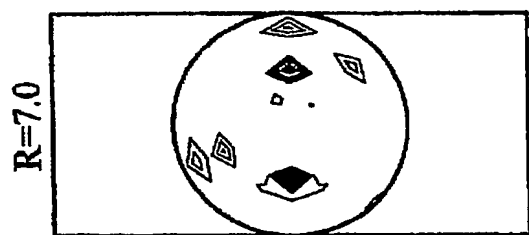
【図 19】



(a)

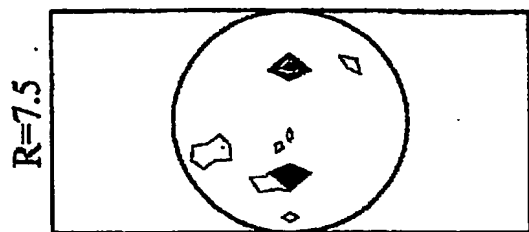


(b)

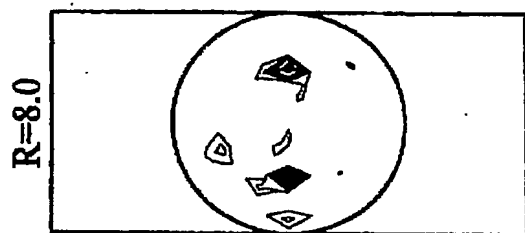


(c)

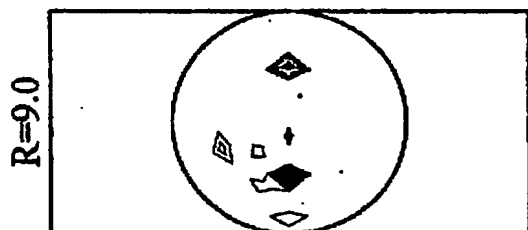
【図 20】



(d)

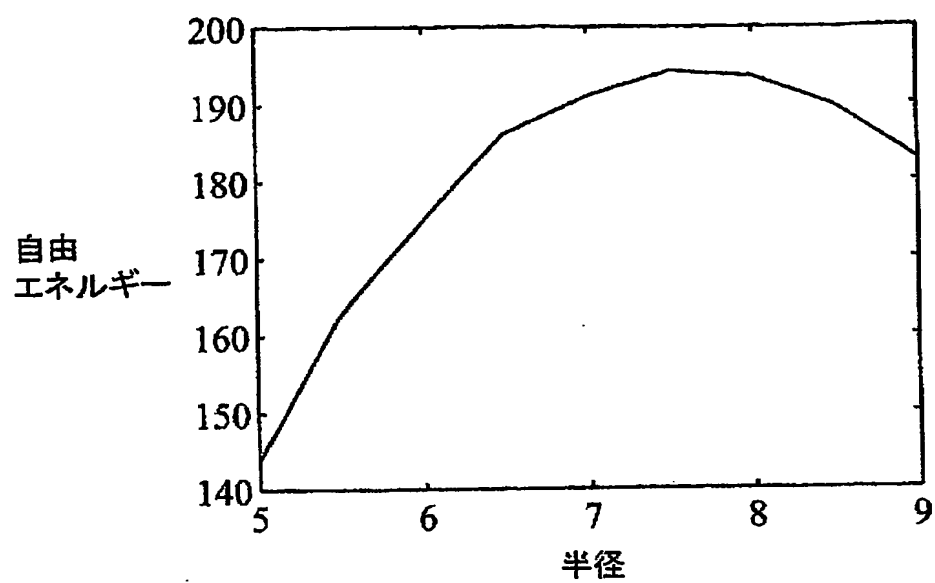


(e)

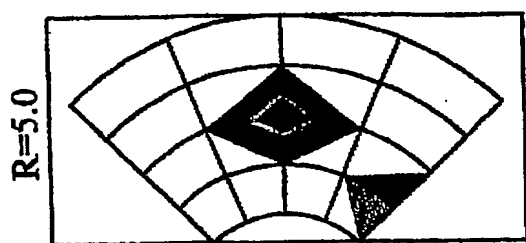


(f)

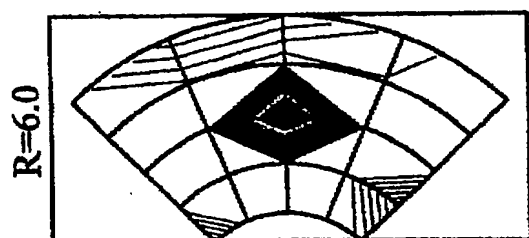
【図 2 1】



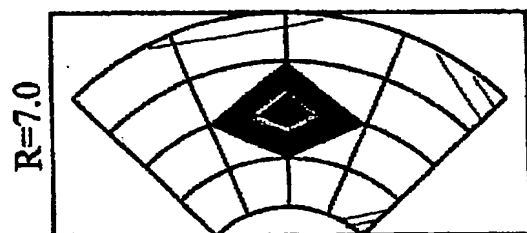
【図 2 2】



(a)

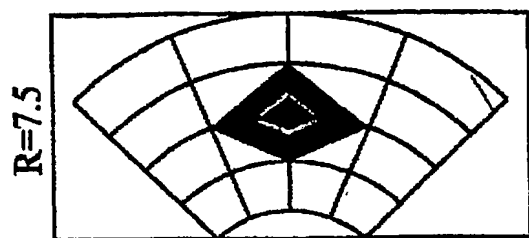


(b)

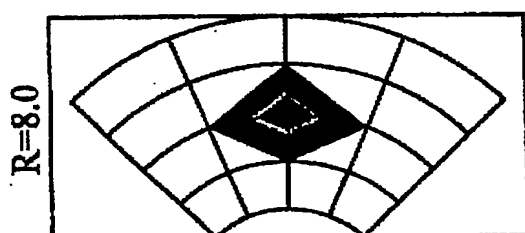


(c)

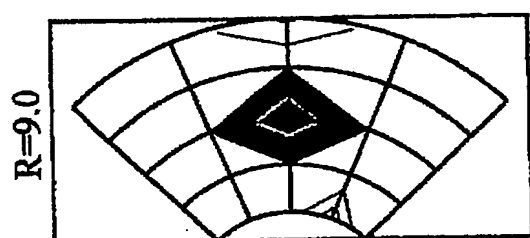
【図 2 3】



(d)



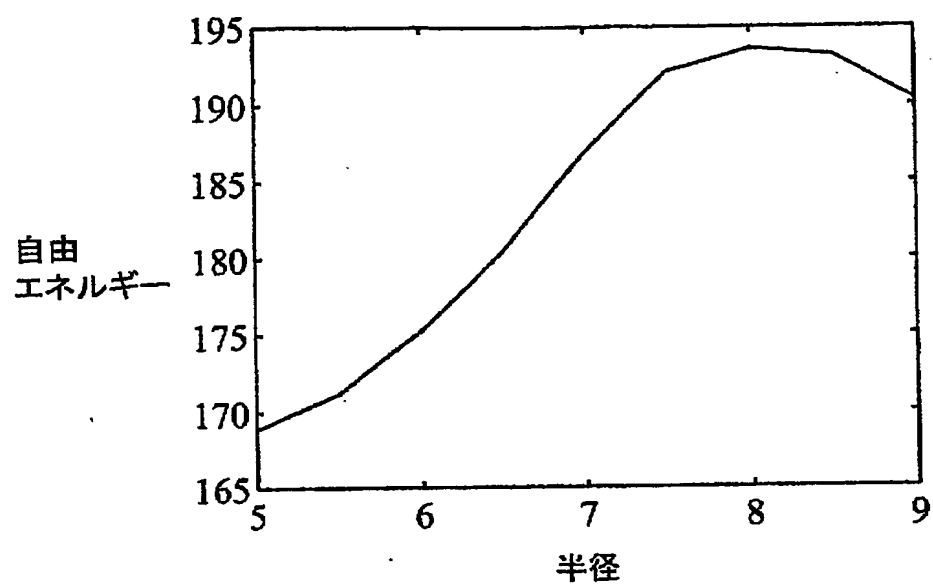
(e)



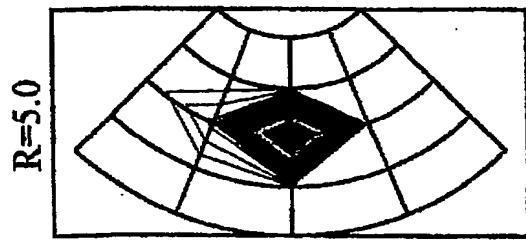
(f)



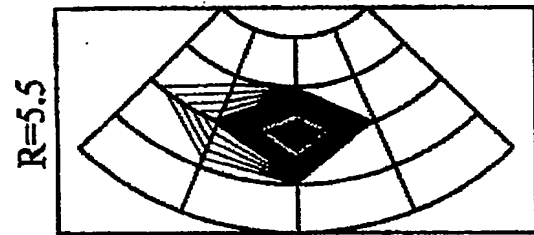
【図 2 4】



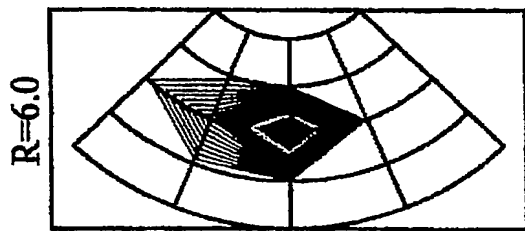
【図 2 5】



(a)

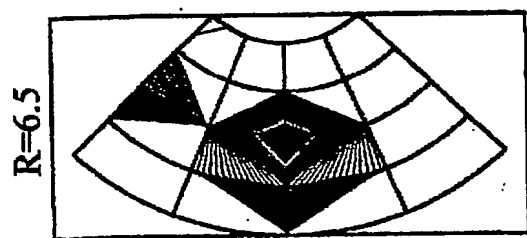


(b)

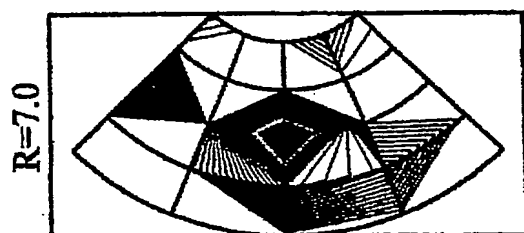


(c)

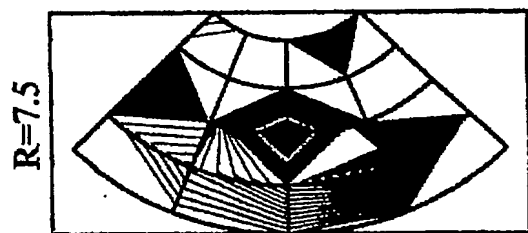
【図 2 6】



(d)

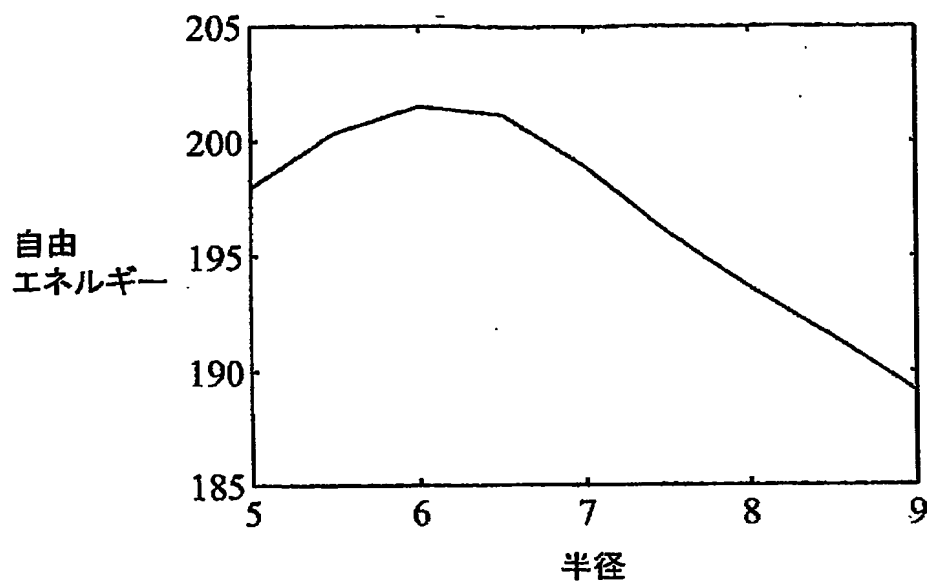


(e)



(f)

【図 2 7】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 観測データから脳内電流源の位置や分布を深さ方向まで含めて推定することが可能な脳内電流源推定方法を提供する。

【解決手段】 電流源と観測面の間にある仮想曲面上に適当な電流を流すことによって、電流源が発生する電磁場を復元することができ、またこの曲面が真の電流源に近づくほど曲面上の電流分布の広がりが小さくなることに基づいて、観測データを復元する電流源に対するベイズ推定を行う。この推定の際に、モデル事後確率は曲面が電流源を含むときに最大になること、すなわちモデル事後確率を調べることにより電流源の位置を深さ方向まで含めて推定する。

【選択図】 図 3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [396020800]

1. 変更年月日	1998年 2月24日
[変更理由]	名称変更
住 所	埼玉県川口市本町4丁目1番8号
氏 名	科学技術振興事業団

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[393031586]

1. 変更年月日

2000年 3月27日

[変更理由]

住所変更

住 所

京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2

氏 名

株式会社国際電気通信基礎技術研究所